

**Differenzierte Analyse verschiedener leistungsdagnostischer
Untersuchungsmethoden zur Optimierung der Trainingsanalyse
und –steuerung im Kanurennsport**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der

Fakultät für Humanwissenschaften
der



Vorgelegt von
Manuel Matzka
aus Hamm

Würzburg

2022

Betreuer: Prof. Dr. Billy Sperlich
Erstgutachter: Prof. Dr. Lars Donath
Zweitgutachter: Prof. Dr. Olaf Hoos

Tag des Kolloquiums: 07.12.2022

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis.....	X
I. Studienverzeichnis	1
a. Weitere Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation.....	1
II. Kurzzusammenfassung	2
III. Abstract.....	5
1. Einleitung	8
1.1. Physiologisches Anforderungsprofil im Kanurennsport.....	8
1.2. Ausdauerleistungsdiagnostik im Kanurennsport.....	11
1.3. Monitoring der Trainingsintensität.....	12
1.3.1. Theoretisches Konzept der Trainingssteuerung.....	16
1.4. Verteilung der Trainingsintensität im Ausdauersport.....	18
1.5. Trainingsintensität im Kanurennsport	20
1.6. Quantifizierungsmethoden der Trainingsintensität.....	22
1.7. Fazit	23
1.8. Problemdarstellung.....	23
1.9. Zielstellung und Vorgehen.....	24
2. Einzelstudien	27
2.1. Studie 1: Comparison of physiological parameters during on-water and ergometer kayaking and their relationship to performance in sprint kayak competitions.....	27
2.1.1. Problemdarstellung.....	27
2.1.2. Untersuchungsdesign.....	28
2.1.3. Zusammenfassende Ergebnisdarstellung.....	30
2.1.4. Kurzfazit.....	30

2.2.	Studie 2: The Relationship Between the Distribution of Training Intensity and Performance of Kayak and Canoe Sprinters: A Retrospective Observational Analysis of One Season of Competition.....	31
2.2.1.	Problemdarstellung.....	31
2.2.2.	Untersuchungsdesign.....	32
2.2.3.	Zusammenfassende Ergebnisdarstellung.....	35
2.2.4.	Kurzfasit.....	37
2.2.5.	Ausblick	38
2.3.	Studie 3: Retrospective analysis of training intensity distribution based on race pace vs. physiological benchmarks in highly trained sprint kayakers	39
2.3.1.	Problemdarstellung.....	39
2.3.2.	Untersuchungsdesign.....	41
2.3.3.	Zusammenfassende Ergebnisdarstellung.....	42
2.3.4.	Kurzfasit.....	43
3.	Diskussion	44
3.1.	Feldbasierte Leistungsdiagnostik auf dem Wasser vs. laborbasierte Diagnostik auf dem Kanu-Ergometer	44
3.1.1.	Zusammenhänge zwischen Leistungsdiagnostik und Wettkampfleistung.....	44
3.1.2.	Unterschiede zwischen der Leistungsdiagnostik auf dem Wasser und auf dem Ergometer ..	46
3.2.	Analyse der Trainingsintensitätsverteilung und der Quantifizierungsmethoden im Kanurennsport.....	48
3.2.1.	Die Trainingsintensitätsverteilung im Saisonverlauf	48
3.2.2.	Einfluss der Quantifizierungsmethode auf die Darstellung der Trainingsintensitätsverteilung 52	
3.2.3.	Die Wahl der Quantifizierungsmethode in Abhängigkeit der Saisonphase	55
4.	Zukünftiger Forschungsbedarf	57
4.1.	Inter- und intraindividuelle Variabilität der Trainingsintensitätsverteilung	57
4.2.	Der Einfluss diverser (Alltags-)Belastungen auf die Gestaltung der Trainingsintensität 59	
4.3.	Forschung zur Trainingsintensitätsverteilung von Frauen	60
5.	Fazit	62
6.	Literaturverzeichnis	64
IV.	Methodenverzeichnis	76

V.	Gesamttexte der Studien	78
a.	Studie 1	78
b.	Studie 2	94
c.	Studie 3	109

Danksagung

Eine Promotion stand sicher nie auf der Agenda meines Lebens. Meine schulische Laufbahn hat mich nie auch nur daran denken lassen, dass dieser Werdegang eine Option darstellen könnte. Die Schule war nie in der Lage mir Spaß am Lernen zu vermitteln, geschweige denn einen Sinn in dem Gelernten zu erkennen.

Letztendlich hat mich meine Passion, der Kanurennsport, dazu veranlasst ein Sportstudium anzugehen, um mehr von dem zu verstehen was ich über viele Jahre mit meinem Körper angestellt habe und warum es bei mir nie so lief, wie ich es mir gewünscht hätte. Im Verlauf des Studiums hat sich mein Denken über das Lernen von Grund auf gewandelt. Auf einmal konnte ich das Gelernte in einen für mich verständlichen und sinnvollen Kontext bringen. Neues Wissen aneignen war auf einmal nichts von außen Auferlegtes mehr, sondern vielmehr ein innerer Antrieb. Insofern muss ich zuallererst dem Kanurennsport und nicht einer Person danken, weil er die Grundlage dafür darstellt, dass ich den Lernprozess mittlerweile als etwas Bereicherndes empfinde.

Billy, zunächst möchte ich natürlich insbesondere Dir dafür danken, dass du mir dieses Projekt „Promotion“ ermöglicht hast. Letztendlich kanntest du mich maximal flüchtig aus SpoHo-Zeiten und hast dich dennoch sofort darauf eingelassen mein Betreuer zu sein. Danke dafür! Es ist schwer zusammen zu fassen, was ich in dieser Zeit alles von dir gelernt habe, aber es sind definitiv zwei Dinge, die für mich ganz oben stehen:

(1) Einfach machen! - Für mich im Kontext der Wissenschaft etwas ungewohntes/unbekanntes, aber du verstehst es die Dinge einfach zu tun und ermutigst einen zum selbigen. Mir hat es definitiv geholfen in die Gänge zu kommen, obwohl ich eigentlich alles zerdenke was ich tue.

(2) „Think outside the box“ - Du hast aufgezeigt, dass es OK ist und auch wichtig, über den Status Quo hinauszudenken und diesen nicht als unumstößlich anzusehen. Genau das ist es, was mir persönlich den meisten Spaß in der Arbeit mit dir bereitet hat.

Christoph, du bist mein Schlüssel in diese Promotion. Wer hätte gedacht, dass die Teilnahme an diversen Lebensgeister-raubenden HIIT-Studien in meiner SpoHo-

Zeit diese für mich nützlichen Langzeiteffekte mit sich bringen. Ich danke dir von Herzen, dass du mir den Kontakt zu Billy erleichtert hast und mich in meinem Vorhaben unterstützt hast. Letztendlich warst du im gesamten Promotionsprozess wohl meine größte Hilfe, indem du immer ein offenes Ohr hattest, mit mir über diverse Themen diskutiert und mir Feedback zu meinen Gedanken gegeben hast sowie bei fast allen Untersuchungsterminen dabei warst oder auch mal geholfen hast Billy zu verstehen ;)

Daniel. Es begann auf deiner Schlafcouch im SpoHo-Turm und hat sich auf der roten Couch in Stirling zu was ganz Großem gefestigt :D Schottland ist und bleibt einer meiner geilsten Lebensabschnitte und irgendwo ist es auch der Beginn Richtung Promotion gewesen. Hätten wir zwei Dummbatze in Stirling nicht von diesem S&C Master gehört, wer weiß wohin die Reise gegangen wäre. Ich feire es, dass wir es beide so weit gebracht haben! Dabei haben wir doch alles gegeben, nicht so zu wirken, als könnten wir sowas :D Danke dir für die unzähligen sinnlosen Gespräche, den perfekt ineinandergreifenden hirnlosen Humor, die Entdeckung des großen sowie kleinen Internets und die Möglichkeit die Leiden der Promotionszeit zu teilen! Ganz nebenbei war es dann auch immer noch hilfreich Input von dir zu bekommen, um abzusichern, ob man mit seinen Ideen wirklich in die Welt laufen kann oder besser schweigt. ;)

Mein **Wolfsrudel!** So unterschiedlich wir auch sein mögen, am Ende haben wir uns doch noch nie gestritten :D Danke für euren Support über die Jahre! Wenn man überlegt, was wir mittlerweile alles so zusammen erlebt haben, einfach nur geil! Auch wenn grad noch nicht alles durch ist, freue ich mich schon extrem nach Abschluss mit euch das Ganze gebührend zu feiern! Natürlich im Wolfsrudel-Style! :D Wer hätte damals, als wir den ersten Trip nach Malle angetreten haben, gedacht, dass ich euch mal in meiner Doktorarbeit erwähnen werde... ich ganz sicher nicht :D Aber letztendlich scheinen wir ja alle noch den Pfad der Tugend gefunden zu haben! BIN STOLZ AUF UNS!! AAAAAUUUUUUUUU!!!!!!!

Liebe **Mama**, lieber **Papa**, was soll ich sagen... Ich weiß mein Weg ist nicht so geradeaus und irgendwie gehe ich immer wieder mal ein paar Schritte zurück, in der Hoffnung, dass es dann auch wieder ein paar größere Schritte vorwärts geht.

Möglich ist das alles nur, weil ich EUCH habe! Niemals hätte ich mir erträumt, dass ich mal meine Doktorarbeit schreibe. Und jetzt sitze ich hier und schreibe diese Danksagung. Danke, dass ihr mir das ermöglicht habt! Danke, dass ihr immer an mich geglaubt habt! Danke, dass ihr mich immer ohne Wenn und Aber unterstützt habt! Danke, dass ich niemals das Gefühl hatte, dass es mir an irgendetwas fehlt! Danke, für alle wichtigen Tugenden, die ihr mir mitgegeben habt, um so etwas zu schaffen! Danke für eure bedingungslose Liebe! Diese Arbeit ist ganz sicher auch zu einem großen Teil euer verdienst! Ich liebe euch!

Christian, Bruderherz, du bist auf so viele Weisen unersetzbar für mich! Du bist mein Vorbild, mein bester Freund, mein größter Supporter, meine Stütze. Du zeigst mir tagtäglich, dass man alles erreichen kann, wenn man es nur wirklich will und sich nicht darum schert was andere davon halten. Du gibst mir immer wieder dieses unfassbare Gefühl, dass ich viel mehr erreichen kann. Zwar fällt der Groschen langsam, aber ich merke dennoch, dass ich dank deines Inputs und deines Vorbilds immer mehr dahin komme, wo ich hinwill! Danke für deine Unterstützung in den letzten Jahren und dafür, dass du mir die Möglichkeit gegeben hast, diese Promotion sorgenfrei durchzuziehen. Und sowieso danke dafür, dass du mir schon seit unserer Kindheit das Gefühl gibst, in dir meinen größten Fan zu haben! Das bedeutet mir alles! Ich liebe dich!

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
AVP	allgemeine Vorbereitungsperiode
BLa [mmol·L ⁻¹]	Blutlaktat
bpm	beats per minute = Schläge pro Minute
C	Canadier
cm	Zentimeter
<i>d</i>	Effektstärke nach Cohen (1988)
DKV	Deutscher Kanu Verband
GA	Grundlagenausdauer
GPS	Global Positioning System
HF [S·min ⁻¹]	Herzfrequenz
HF _{max} [S·min ⁻¹]	Maximale Herzfrequenz
K	Kajak
kg	Kilogramm
L	Liter
m	Meter
<i>M.</i>	Musculus
min	Minuten
ml	Milliliter
mmol	Millimol
NRW	Nordrhein-Wesfalen
p	Statistisches Signifikanzniveau
r	Korrelationskoeffizient
RPE	Ratings of perceived exertion = Subjektives Belastungsempfinden

Abkürzung	Erklärung
RTK	Rahmentrainingskonzeption
s	Sekunden
SF [$\text{S} \cdot \text{min}^{-1}$]	Schlagfrequenz
Std.	Stunden
SVP	spezifische Vorbereitungsperiode
TID	engl.: <i>Training intensity distribution</i> = Trainingsintensitätsverteilung
TID _{BLa-HF}	Trainingsintensitätsverteilung basierend auf physiologisch determinierten Trainingszonen gemessen mittels Herzfrequenz
TID _{BLa-V}	Trainingsintensitätsverteilung basierend auf physiologisch determinierten Trainingszonen gemessen mittels Geschwindigkeit
TID _{WK-V}	Trainingsintensitätsverteilung basierend auf physiologisch determinierten Trainingszonen gemessen mittels Geschwindigkeit
$v_{2[\text{Bl}a]}$; $v_{4[\text{Bl}a]}$	Geschwindigkeit bei 2 und 4 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Blutlaktat
$\text{VO}_{2\text{max}}$ [$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$]	Maximale Sauerstoffaufnahme ermittelt während einer Leistungsdiagnostik
$\text{VO}_{2\text{peak}}$ [$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$]	Maximale Sauerstoffaufnahme (gemittelt über ein 30-s Intervall) ermittelt während einer Leistungsdiagnostik
VT	engl.: <i>Ventilatory threshold</i> = ventilatorische Schwelle
W	Watt
WP	Wettkampfperiode
Z	Zone

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Einteilung der Trainingsintensität nach dem Drei-Zonen-Modell (vgl. Seiler 2010) anhand diverser physiologischer und subjektiver Belastungsparameter (Borg, 1970). VO_{2max} = maximale Sauerstoffaufnahme, HF_{max} = maximale Herzfrequenz; LT_1 = aerobe Laktatschwelle; LT_2 = anaerobe Laktatschwelle; VT_1 = 1. ventilatorische Schwelle; VT_2 = 2. ventilatorische Schwelle.	13
Abbildung 2. Die wichtigsten zonenspezifischen physiologischen Anpassungen in Bezug auf die Trainingsintensitäten nach dem Drei-Zonen-Modell (in Anlehnung an Seiler, 2010). (Diverse Anpassungen werden sowohl Training in Zone 3 als auch in Zone 1 zugesprochen, wobei die Evidenz für bestimmte Anpassungen Zone 1 oder Zone 2 favorisiert → fett geschrieben).	15
Abbildung 3. Modell der kybernetischen Trainingssteuerung (modifiziert nach Hohmann et al., 2014)	17
Abbildung 4. Modell zum Kontinuum der Verteilung der Trainingsintensität im Ausdauersport und deren Einflussfaktoren nach aktuellem wissenschaftlichen Konsens.	20
Abbildung 5. Übersicht der Themen und Studien.	26
Abbildung 6. Studiendesign Studie 2 (Übersetzt aus Matzka, Leppich, Holmberg, et al., 2022)	33
Abbildung 7. Intraindividuelle absolute und relative Intensitätsverteilung von drei (a, b, c) Athlet:innen (übersetzt aus Matzka, Leppich, Holmberg, et al., 2022). ...	37
Abbildung 8. Studiendesign Studie 3 (übersetzt aus Matzka, Leppich, Sperlich, et al., 2022)	41
Abbildung 9. Kinetik des Paddelzugs während der vortriebsgenerierenden Wasserphase (Zugphase). F_x = Kraft in x-Richtung, F_y = Kraft in y-Richtung, F_r = resultierende Kraft (übersetzt und modifiziert von Michael et al., 2009)	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Intensitätszonen für Ausdauertraining (Seiler, 2010) 14

Tabelle 2. Trainingsbereiche nach DKV 14

I. Studienverzeichnis

- Matzka M, Zinner C, Kunz P, Holmberg HC, Sperlich B. Comparison of Physiological Parameters During On-Water and Ergometer Kayaking and Their Relationship to Performance in Sprint Kayak Competitions. *Int J Sports Physiol Perform.* 2021 Feb 24;16(7):958-964. doi: 10.1123/ijsp.2019-0912. PMID: 33626508.
- Matzka, M., Leppich, R., Holmberg, H. C., Sperlich, B., & Zinner, C. The relationship between the distribution of training intensity and performance of kayak and canoe sprinters: A retrospective observational analysis of one season of competition. *Frontiers in Sports and Active Living*, 371. 2022 Jan 5;3:788108. doi: 10.3389/fspor.2021.788108.
- Matzka M, Leppich R, Sperlich B, Zinner C. Retrospective Analysis of Training Intensity Distribution Based on Race Pace Versus Physiological Benchmarks in Highly Trained Sprint Kayakers. *Sports Med Open.* 2022 Jan 6;8(1):1. doi: 10.1186/s40798-021-00382-y. PMID: 34989918.

a. Weitere Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation

- Zinner C, Matzka M, Leppich R, Kounev S, Holmberg HC, Sperlich B. The Impact of the German Strategy for Containment of Coronavirus SARS-CoV-2 on Training Characteristics, Physical Activity and Sleep of Highly Trained Kayakers and Canoeists: A Retrospective Observational Study. *Front Sports Act Living.* 2020 Oct 15;2:579830. doi: 10.3389/fspor.2020.579830. PMID: 33345147
- Matzka, M., Zinner, C., Kunz, P., & Sperlich, B. Differenzierte Analyse verschiedener leistungsdiagnostischer Untersuchungsmethoden zur Optimierung der Trainingsanalyse und -steuerung im Kanurennsport. *BISp-Jahrbuch 2020*, 215.

II. Kurzzusammenfassung

Kanurensport ist in Deutschland eine der erfolgreichsten olympischen Sommersportarten und hat mit 12 potenziellen Goldmedaillenchancen eine hohe Bedeutung für den deutschen Spitzensport. In der nationalen als auch internationalen wissenschaftlichen Forschung ist Kanurensport jedoch bis dato unzureichend untersucht. Dabei stellt Kanurensport als eine der wenigen vorrangig durch die Oberkörpermuskulatur angetriebenen Sportarten eine Besonderheit dar. Ein zentraler Forschungsschwerpunkt ist seit einigen Jahrzehnten die Erforschung der optimalen Verteilung der Trainingsintensität (engl. training intensity distribution; TID) für die Leistungsentwicklung von Ausdauerathlet:innen. Häufig wird die Trainingsintensität hierzu in einem Drei-Zonen-Modell kategorisiert, bei dem Zone (Z) 1 einer Intensität unterhalb der aeroben Schwelle, Z2 der Intensität zwischen der aeroben und anaeroben Schwelle und Z3 Intensitäten oberhalb der anaeroben Schwelle entspricht. Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass sich die TID nicht nur in Abhängigkeit von Sportart, Belastungsform, Trainingsstatus und Saisonphase unterscheidet, sondern auch in Abhängigkeit von der eingesetzten Quantifizierungsmethode (z.B. Herzfrequenz, Geschwindigkeit, Wattleistung, etc.). Für die Sportart Kanurensport besteht bezüglich TID-Forschung großer Nachholbedarf, da bisherige Untersuchungen ausschließlich in Ausdauerportarten stattfanden, die hauptsächlich den Unterkörper (z.B. Radfahren, Laufen) oder Ober- und Unterkörper (Schwimmen, Rudern) in die Vortriebsgenerierung einbinden. Bislang fehlen Informationen zu rein aus dem Oberkörper angetriebenen Sportarten.

Als Grundlage für die Bestimmung der Trainingsintensitätszonen werden in Trainingspraxis und Forschung Stufentests zur Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme sowie der Leistung an der aeroben und anaeroben ventilatorisch- und/oder laktatbasierten Schwelle angewandt. Die Stufentest werden im Kanurensport aktuell vorrangig mittels Labordiagnostik auf dem Kanu-Ergometer durchgeführt, da diese weniger stark durch die diversen Umwelteinflüsse (Wind, Wellen, Temperatur, Strömung, etc.) beeinträchtigt wird. Jedoch gibt es Hinweise, dass die Belastung auf dem Ergometer biomechanisch und physiologisch von der auf dem Wasser im Kanurensport abweicht, sodass deren Mehrwert für die Diagnostik und die Trainingsplanung in Frage zu stellen ist.

Ziel der vorliegenden kumulativen Dissertation war es

- (1) zu untersuchen, inwiefern eine laborbasierte Leistungsdiagnostik einer feldbasierten im Kanurennsport entspricht (*Studie 1*) und daraufhin die Methoden der Leistungsdiagnostik für die Studien 2 und 3 zu wählen; und
- (2) erste wissenschaftliche Erkenntnisse zur TID und deren Quantifizierungsmethodik in der Sportart Kanurennsport zu gewinnen (*Studie 2 & 3*).

Diese sollten dann mit dem Wissensstand aus Sportarten, die obere und untere Extremitäten (z.B. Biathlon, Rudern) bzw. primär die unteren Extremitäten (z.B. Radsport, Laufen) für den Vortrieb einsetzen, abgeglichen werden.

Zusammenfassend konnte zunächst in *Studie 1* aufgrund von Unterschieden in der VO_2 , der Muskeloxygenierung im *Musculus biceps brachii* sowie im subjektiven Belastungsempfinden dargestellt werden, dass sich eine Belastung auf dem Wasser von der auf dem Ergometer unterscheidet und somit eine wasserbasierte Leistungsdiagnostik im Kanurennsport vorzuziehen ist.

Die Ergebnisse aus den *Studien 2 und 3* zeigten, dass die TID im Saisonverlauf variiert und im Mittel einen hohen Anteil (80–90%) niedrigintensiven Trainings (Z1) aufwies, wobei in der Vorbereitungsphase eine pyramidale TID Struktur ($Z1 > Z2 > Z3$) und in der Wettkampfvorbereitung die Tendenz zu einer vermehrt polarisierten Struktur ($Z1 > Z3 > Z2$) gefunden wurde. Somit weisen die Ergebnisse trotz der physiologischen sowie biomechanischen Unterschiede zu Sportarten, die Ober- bzw. Ober- und Unterkörper bei der Vortriebsgenerierung einsetzen, eine vergleichbare TID Struktur im Kanurennsport auf. Es ist zu vermuten, dass der geringe Impact auf das Skelettmuskelsystem und die damit einhergehende Möglichkeit, sehr hohe Trainingsvolumen mit der vergleichsweise kleinen Oberkörpermuskulatur zu verwirklichen, diese TID-Struktur bedingen. Zudem konnte dargestellt werden, dass die Wahl der Quantifizierungsmethode (extern vs. intern; basierend auf physiologischen Parametern vs. Wettkampftempo) die Darstellung der TID beeinflusst. Für eine adäquate Vergleichbarkeit und den gezielten Einsatz muss insofern in der Forschung wie auch in den Sportarten ein

Konsens über die Wahl der Quantifizierungsmethode erarbeitet werden. Es scheint zudem empfehlenswert die TID-Quantifizierungsmethode anhand der Trainingsphase auszuwählen, wobei sich in der allgemeinen und spezifischen Vorbereitungsperiode vorzugsweise eine TID Quantifizierung nach physiologischen Kenngrößen empfiehlt. Hierbei erscheint ein Mix aus HF-basierter Analyse für Z1 sowie für längere Belastungen in Z2 und geschwindigkeitsbasierter Analyse für Z3 sowie kürzere Belastungen der Z2 zweckmäßig. In der Wettkampfvorbereitung stellt sich dann zusätzlich eine Zoneneinteilung basierend auf dem Wettkampftempo als sinnvoll dar.

Aufgrund der starken intra- und interindividuellen Variation der TID ist der individuelle Mehrwert der auf dem Gruppenmittelwert basierenden Ergebnisse jedoch zu hinterfragen und weist auf den Bedarf nach einer individuelleren Betrachtung der TID und ihrer Effekte hin. Genauso stellt sich ein starker Einfluss der allgemeinen physischen Aktivität sowie psychischer Belastungen auf die TID und ihre Effekte dar, der wiederum die Notwendigkeit eines holistischen Betrachtungsansatzes für zukünftige Forschung aufzeigt. Außerdem gibt es im Allgemeinen eine große Wissenslücke in Bezug auf Athletinnen in der TID-Forschung, weshalb die bisherigen Erkenntnisse für die Trainingsgestaltung weiblicher Athleten mit Vorsicht behandelt werden müssen.

III. Abstract

Germany is one of the most successful nations at the summer Olympics in the sport of canoe sprint. With 12 events and therefore chances to win gold at the Olympics, the sport is important in German elite sports. However, research regarding canoe sprint is lacking, both nationally and internationally. Even though the sport displays a uniqueness, as the work is primarily performed with the musculature of the upper body. Within the last decades, one major topic within endurance sports research was the analysis of the optimal training intensity distribution (TID) to enhance performance adaptation in endurance athletes. Commonly, training intensity is categorized into a three-zone model with zone (Z) 1 being equal to intensities below the aerobic threshold, Z2 ranging between the aerobic and anaerobic threshold and Z3 being characterized as intensities above the anaerobic threshold. Research yields evidence that the TID is not only a consequence of the respective type of sport, exercise demands, training level of the athlete and phase of the season but also depends on how TID is quantified (e.g., heart rate, velocity, power, etc.). As existing research has focused on TID analysis in sports that propel the body with the lower-body (e.g., running, cycling) or the whole-body (e.g., swimming, rowing) musculature, evidence is lacking regarding the TID in sports primarily powered by the upper-body musculature like canoe sprint.

To individually determine the distinct training intensity zones for each athlete, researchers and practitioners use incremental step tests to determine the maximum oxygen uptake and the performance corresponding to the aerobic and anaerobic lactate- or ventilatory-threshold. In canoe sprint, these incremental tests are generally implemented during laboratory tests using special canoe-/kayak-ergometers, as in the laboratory, environmental influences (wind, waves, temperature, stream) are significantly reduced. However, evidence suggests that the demands during ergometer bouts differ physiologically and biomechanically from specific on-water demands. Thus, the overall value of laboratory testing for performance diagnostics and training considerations must be questioned. Consequently, the current cumulative dissertation project aimed to

- (1) examine whether a laboratory-based performance diagnostic is comparable to a water-based diagnostic (*study 1*) and hereafter to choose the diagnostic method for the subsequent *studies 2* and *3*; and
- (2) to obtain initial scientific evidence regarding the TID and various quantification methods in canoe sprint (*studies 2 & 3*).

Finally, the outcomes were discussed considering the current knowledge from other sports that primarily implement the lower body (e.g., running, cycling) or the whole body (e.g., biathlon, rowing) for propulsion.

In summary, *study 1* found differences in oxygen consumption, muscle oxygenation in the *musculus biceps brachii*, and the rating of perceived exertion between laboratory- and water-based incremental tests and thus indicated differences in physiological and biomechanical strain between the conditions. This suggests that water-based diagnostics should be preferred in canoe sprint to form proper conclusions from diagnostics and recommendations for training.

Results from *studies 2 & 3* found variation in the TID between the different phases of the season with high fractions (80-90%) of low-intensity training (e.g., Z1) on average, a pyramidal TID (Z1>Z2>Z3) during the preparatory phases and a tendency to a polarized TID (Z1>Z3>Z2) during the competition phase. Thus, the current evidence suggests a TID structure for canoe sprint that is comparable with sports that primarily use the lower-body or whole-body musculature for propulsion, despite differences in physiological and biomechanical demands. It can be assumed that the low impact on muscles, tendons, and bones during kayaking/canoeing and, consequently, the possibility of implementing high training volumes with the comparably small upper body musculature cause this TID structure. Furthermore, it was shown that the chosen TID quantification method (external vs. internal; physiologically based vs. race pace-based) impacts the description of the TID. Consequently, for adequate comparability and targeted implementation, both research and practice need to build a consensus regarding the choice of the TID quantification method. Furthermore, choosing the TID quantification method seems advisable depending on the training phase. Here, during the general and specific preparatory phase, TID quantification based on physiological measures is recommended, with a mix of heart rate-based analysis for Z1 sessions and sessions

with longer-lasting Z2 bouts and velocity-based measures for Z3 and sessions with comparably short Z2 bouts. Additionally, quantifying TID based on race pace during the competition phase seems helpful.

However, the large intra- and interindividual variation in the TID found in the current analyses raises doubts regarding the overall value of the current results based on group means and consequently increases the need for a more individual approach to the analysis of TID and its effects on performance. Similarly, there appears to be a considerable impact from general physical activity and psychological stressors on the TID and its effects, highlighting the need for a more holistic approach to the analysis of TID for future research. In addition, there is a lack of research on the TID in female athletes. Therefore, extrapolation of current knowledge for training prescription of female athletes should be done with caution.

1. Einleitung

Seit den olympischen Spielen 1936 in Berlin ist Kanurennsport Bestandteil der olympischen Sommerspiele mit aktuell 12 potenziellen Goldmedaillen in den verschiedenen Bootsklassen und Wettkampfstrecken. In Deutschland hat sich der Kanusport seit seiner Einführung zu einer der medaillenträchtigen olympischen Sommersportarten entwickelt. In der ewigen Nationenwertung der olympischen Medaillengewinner im Kanurennsport liegt Deutschland auf Rang 1 („Liste der Olympiasieger im Kanusport/Nationenwertungen“, 2021). Der Deutsche Kanu Verband (DKV) stellt mit Birgit Fischer bis heute die erfolgreichste deutsche Olympionikin bei den Sommerspielen mit acht Gold- sowie vier Silbermedaillen, womit sie aktuell noch immer auf Platz 7 der erfolgreichsten Sportler:innen der Olympischen Sommerspiele überhaupt steht (Zeppenfeld, 2021). Über die Jahrzehnte hat sich das Wettkampfprogramm im Kanurennsport diverse Male verändert. Zuletzt starteten bei den Olympischen Spielen in Tokio 2021 Frauen über die 200 und 500 m Distanz und Männer über 200, 500 und 1000 m, wobei erstmalig sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen Wettkämpfe in Kajaks (K) und Canadiern (C) ausgetragen wurden. Neben den Einzelwettkämpfen (K1, C1) werden zudem Wettkämpfe im K2, K4 sowie C2 ausgetragen. Da sich die Sportler:innen über ihre Individualleistungen im K1/C1 für Mannschaftsboote qualifizieren, fokussiert sich das Training und auch die Trainingslehre/-methodik im Kanurennsport vorrangig auf die Entwicklung der individuellen Leistungsfähigkeit (Ferrero, 2006; Isorna Folgar et al., 2015; Kahl, 2005).

1.1. Physiologisches Anforderungsprofil im Kanurennsport

Um die Sportler:innen bestmöglich auf die Wettkampfbelastungen vorzubereiten, ist ein umfangreiches Wissen über die spezifischen physiologischen Anforderungen im Kanurennsport essenziell (D. Bishop, 2000). Kanurennsport ist eine Kraftausdauersportart, bei der je nach olympischer Distanz, Bootsklasse und Geschlecht die Belastungszeiten von ca. 35-40 s (200 m) über 1:35-1:50 min (500 m) bis hin zu 3:30-3:50 min (1000 m) im K1/C1 reichen (Jahn et al., 2011). In den

Mannschaftsbooten fallen die Zeiten entsprechend kürzer aus. Die 200 m Distanz ist hierbei den anaeroben Ausdauerbelastungen mit einer hauptsächlich glykolytischen Energiegewinnung zuzuordnen (Haff & Triplett, 2015). Auch wenn über die 200 m der aerobe Anteil „nur“ noch bei ca. 37-40% liegt, stellt die aerobe Energiebereitstellung eine wichtige Komponente der Leistungsfähigkeit dar (Byrnes & Kearney, 1997; Zamparo et al., 1999). Die 500 m fallen in den Grenzbereich zwischen langen anaeroben und kurzen aeroben Ausdauerbelastungen, die teilweise durch die Glykolyse und teilweise den oxidativen Stoffwechsel bestimmt werden (Haff & Triplett, 2015). Die 1000 m sind in den Bereich der kurzen aeroben Ausdauerbelastungen einzuordnen, wobei hauptsächlich der oxidative Stoffwechsel die Energiebereitstellung bestimmt. Dennoch wird auch mittels Glykolyse ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Energiebereitstellung abgedeckt (Haff & Triplett, 2015). Kanurennsportler:innen weisen hierbei mit 62-78% für die 500 m bis hin zu 82-87% für die 1000 m Distanz in allen Olympischen Distanzen einen hohen Anteil der aeroben Energiebereitstellung auf (Byrnes & Kearney, 1997; Zamparo et al., 1999; Zouhal et al., 2012). Über die verschiedenen Wettkampfstrecken hinweg spielt die aerobe Energiebereitstellung beim Kanurennsport folglich eine bedeutende Rolle (van Someren & Howatson, 2008). Entsprechend konnten hohe Korrelationen zwischen der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) und der Leistung über 200 m ($r = 0,86$) bzw. 1000 m ($r = 0,9$) bei gut trainierten Kanurennsportler:innen der Junior:innenaltersklasse aufgezeigt werden (Borges et al., 2015). Verglichen mit leichtathletischen Laufdisziplinen mit ähnlichen Belastungszeiten scheint die aerobe Energiebereitstellung im Kanurennsport sogar eine größere Rolle zu spielen. Es wird vermutet, dass dies das Resultat der unterschiedlichen Muskelmasse ist, die in die jeweiligen Fortbewegungstechniken involviert ist (Zouhal et al., 2012).

Neuere Untersuchungen konnten jedoch darstellen, dass die gemeinsame Betrachtung der Veränderungen der peripheren Muskeloxygenierung (gemessen mittels Nahinfrarotspektroskopie) im *Musculus (M.) latissimus dorsi*, *M. biceps brachii* sowie *M. vastus lateralis* bei Stufentests auf einem C1/K1-Ergometer bei hochtrainierten Kanurennsportler:innen noch bessere Prädiktoren der Leistung bei Zeitfahrten auf dem Wasser sind als die VO_{2max} . Dieses Ergebnis war sogar unabhängig von der gefahrenen Distanz [200, 500, 1000 m] (Paquette et al., 2018). Die Autoren vermuten, dass die Spannung in der eher kleinen

vortriebsgenerierenden Oberkörpermuskulatur bei den supramaximalen Wettkampfbelastungen ($> VO_{2max}$) den Perfusionsdruck übersteigt und somit die Sauerstoffzufuhr limitiert (Paquette et al., 2018). Das lässt auf eine gut ausgeprägte periphere Muskeloxygenierung bei Kanurennsportler:innen schließen (Paquette et al., 2018) und weist darauf hin, dass die anaerobe Energiebereitstellung für erfolgreiche Wettkampfleistungen im Kanurennsport trotz der hohen aeroben Anforderungen eine ebenso bedeutende Rolle spielen.

Frühere Untersuchungen zeigen entsprechend hohe Korrelationen zwischen der Leistung an der anaeroben Schwelle bei Stufentests auf einem C1/K1-Ergometer mit Zeitfahrten auf dem Wasser (D. Bishop, 2000; Borges et al., 2015). Bishop (2000) fand für die Leistung an der anaeroben Schwelle hierbei höhere Korrelationen mit der 500 m Zeitfahrleistung ($r = -0,89$) im Vergleich mit der relativen VO_{2max} . Borges et al. (2015) fanden hingegen höhere Korrelationen für relative (200 m: $r = -0,76$; 1000 m: $r = -0,84$) als auch absolute VO_{2max} (200 m: $r = -0,86$; 1000 m: $r = -0,90$) mit der 200 m sowie 1000 m Zeitfahrleistung im Vergleich zur Leistung an der anaeroben Laktatschwelle (200 m: $r = -0,74$; 1000 m: $r = -0,75$) (Borges et al., 2015). Die Unterschiede lassen sich möglicherweise durch das Leistungsniveau der untersuchten Sportler:innen erklären. Während Bishop (2000) weibliche Hochleistungskajakfahrerinnen untersuchte, haben Borges et al. (2015) gut trainierte männliche und weibliche Juniorenathleten analysiert. Man kann mutmaßen, dass mit steigendem Leistungsniveau die Notwendigkeit einer gut ausgebildeten anaeroben Leistungsfähigkeit zunimmt.

Zusammenfassend stellen im Kanurennsport, unabhängig von der Wettkampfdistanz, eine sehr gut ausgeprägte aerobe Leistungsfähigkeit in Verbindung mit einem ebenso gut ausgebildeten anaeroben Stoffwechselsystem die Grundlage für erfolgreiche Wettkampfleistungen dar. Dabei weisen die längeren Distanzen (1000 m/500 m) eine höhere Abhängigkeit von der aeroben Energiebereitstellung auf als die 200 m Distanz. Folglich sollte eine adäquate Leistungsdiagnostik im Kanurennsport darauf abzielen, sowohl aerobe (VO_{2peak}) als auch anaerobe (Leistung an der anaeroben Schwelle, Muskeloxygenierung) Parameter zu erheben, um ein möglichst umfassendes Bild über die leistungsrelevanten Messgrößen zu erhalten.

1.2. Ausdauerleistungsdiagnostik im Kanurensport

Für die Bestimmung physiologischer und anderer Leistungsparameter (D. Bishop, 2000; Borges et al., 2015; Carrasco Páez et al., 2010; Fry & Morton, 1991; Paquette et al., 2018; van Someren & Howatson, 2008; van Someren & Oliver, 2002; van Someren & Palmer, 2003; Winchcombe et al., 2019) sowie für die Festlegung und Analyse der TID (García-Pallarés et al., 2009, 2010; Paquette et al., 2019; van Someren & Oliver, 2002) werden verschiedene Stufentests auf dem Wasser im Boot wie auch im Labor auf dem C1-/K1-Ergometer eingesetzt.

Aufgrund der deutlich besseren Kontrollierbarkeit der Testumgebung wurden in Vergangenheit hauptsächlich Labormessungen auf Ergometern implementiert (Bullock et al., 2013; Winchcombe et al., 2019). Jedoch weist die wissenschaftliche Evidenz vermehrt auf dessen Limitierung hin, die sich in der eingeschränkten Replikation der psycho-physiologischen und biomechanischen Anforderungen begründet (Fleming, Donne, Fletcher, et al., 2012; Klitgaard et al., 2021; Villarino-Cabezas et al., 2013; Winchcombe et al., 2019). So zeigen sich Unterschiede bei physiologischen Parametern (Villarino-Cabezas et al., 2013), dem subjektiven Belastungsempfinden [z.B: rating of perceived exertion, RPE] (Winchcombe et al., 2019), der Schlagfrequenz (Klitgaard et al., 2021; Villarino-Cabezas et al., 2013; Winchcombe et al., 2019), der Muskelaktivität (Fleming, Donne, Fletcher, et al., 2012) sowie der Kinematik (Fleming, Donne, Fletcher, et al., 2012; Klitgaard et al., 2021) zwischen Kanu fahren auf dem Ergometer und auf dem Wasser. Eine spezifische Diagnostik auf dem Wasser bietet eine größere praktischen Relevanz in Bezug auf die tatsächlichen Anforderungen bei Kanurensportler:innen und die hochvariablen Umweltbedingungen, wie Außentemperatur, Wassertemperatur, Wind, Luftfeuchtigkeit, etc.. Insbesondere die Entwicklungen bei den portablen Messgeräte für physiologische Parameter [z.B. Spirometrie, Laktatanalysegerät, NIRS etc.] (Macfarlane & Wong, 2012; Perez-Suarez et al., 2018) und der satellitengestützten Distanz- und Geschwindigkeitsmessung haben die Möglichkeiten der wasserbasierten Leistungsdiagnostiken und Trainingsanalysen stark verbessert. Weitere wissenschaftliche Untersuchungen sind notwendig, die den Nutzen der wasserbasierten Diagnostiken für Leistungs- und Trainingsanalysen erforschen. So gibt es beispielsweise bis dato keine wissenschaftliche Untersuchung, die leistungsbezogene Parameter zwischen identischen Stufentests

auf dem Ergometer und Wasser vergleicht und deren Zusammenhänge mit der Wettkampfleistung in Kanurennsportler:innen untersucht.

1.3. Monitoring der Trainingsintensität

Neben der regelmäßigen Leistungsdiagnostik zur Testung des aktuellen Entwicklungsstands der physiologischen Leistungsvoraussetzungen einer/eines Athlet:in ist ein umfassendes Monitoring der Trainingsintensitäten jeder einzelnen Trainingseinheit notwendig, um akkurat und reliabel die Gesamtbelastung des Trainings zu quantifizieren und darauf aufbauend die folgenden Trainingsinhalte zu planen (Mujika, 2017). Zur Analyse und Steuerung des Ausdauertrainings bzw. zur Verbesserung aerober und anaerober Stoffwechselprozesse werden Trainingszonen anhand von Diagnostikengrößen wie beispielsweise der ventilatorisch- (Beaver et al., 1986; Wasserman & McIlroy, 1964), laktat- (Coyle et al., 1991; Davis et al., 1976; Kindermann et al., 1979; Mader & Heck, 1986; Sjödin & Jacobs, 1981; Stegmann et al., 1981; Urhausen et al., 1993) und herzfrequenzbasierten (Conconi et al., 1982) Schwellen ermittelt. Die praktischste Einteilung des Trainings ist eine Unterteilung in drei „Intensitätszonen“ (Dekerle et al., 2008; Seiler, 2010; Stöggel & Sperlich, 2014, 2015), wie in Abbildung 1 dargestellt.

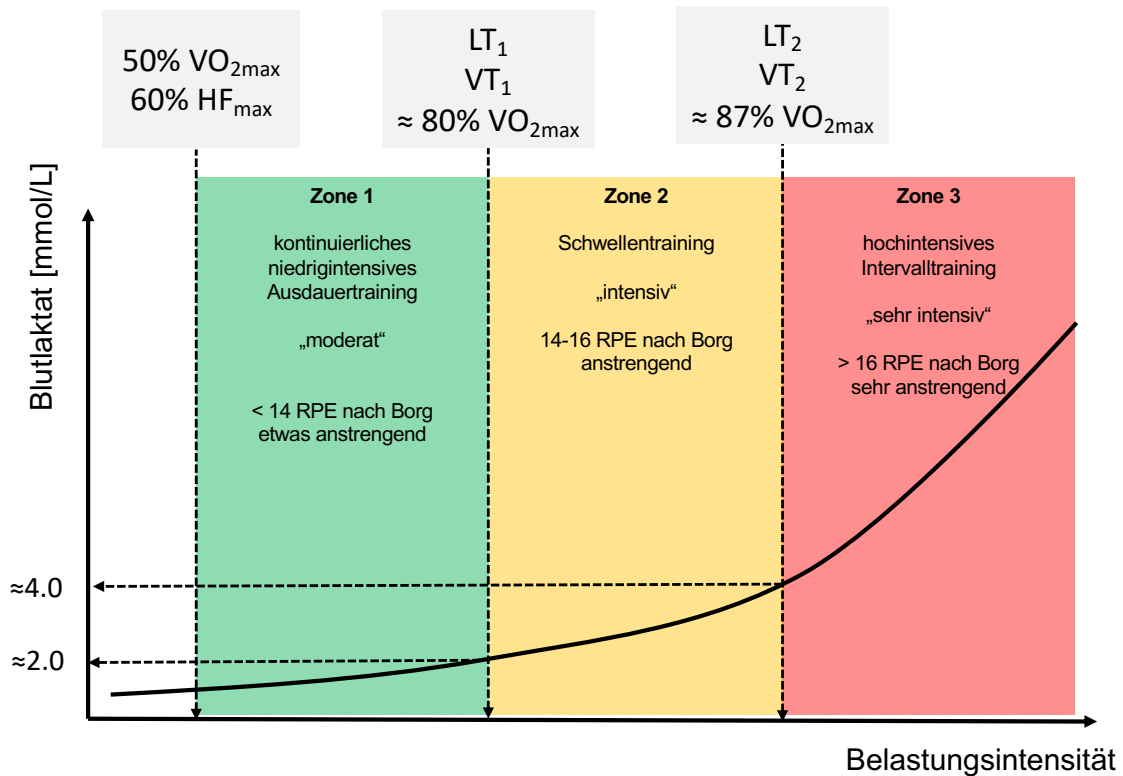


Abbildung 1. Einteilung der Trainingsintensität nach dem Drei-Zonen-Modell (vgl. Seiler 2010) anhand diverser physiologischer und subjektiver Belastungsparameter (Borg, 1970). $\text{VO}_{2\text{max}}$ = maximale Sauerstoffaufnahme, HF_{max} = maximale Herzfrequenz; LT_1 = aerobe Laktatschwelle; LT_2 = anaerobe Laktatschwelle; VT_1 = 1. ventilatorische Schwelle; VT_2 = 2. ventilatorische Schwelle.

Je nach Sportart und Verband werden zwischen drei und neun Intensitäts- und Trainingszonen mit unterschiedlicher Denomination benutzt (Fischerstrand & Seiler, 2004; Orié et al., 2014; Seiler & Kjerland, 2006). Eine international im Ausdauersport häufig eingesetzte Einteilung der Intensitätszonen stellt das 3- oder 5-Zonen-Modell dar (Tabelle 1), das auf Erfahrungen in den Sportarten Skilanglauf, Biathlon und Rudern basiert. Die Einteilung der Zonen des Deutschen Kanu Verband (DKV) ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1. Intensitätszonen für Ausdauertraining (Seiler, 2010)

Intensitäts- zone	VO₂ (%max)	HF (%max)	BLa (mmol•L⁻¹)	Typische Dauer pro Einheit innerhalb Zone
1	50-65	60-72	0,8 – 1,5	1-6 h
2	66-80	72-82	1,5 – 2,5	1-3 h
3	81-87	82-87	2,5 – 4,0	50-90 min
4	88-93	88-92	4,0 – 6,0	30-60 min
5	94-100	93-100	6,0 – 10,0	15-30 min

VO₂ = Sauerstoffaufnahme; HF = Herzfrequenz; BLa = Blutlaktat

Tabelle 2. Trainingsbereiche nach DKV

Denomination Trainingsbereich	Tempo (% WA)	SF (S•min⁻¹)	HF (S•min⁻¹)	BLa (mmol•L⁻¹)
GA1	75-85%	KH 68-74 KD 64-72	140-160	2,5 – 4,0
GA1 extensiv	75%	58-70	140 - 165	
GA1 intensiv	85%	60-72	160 - 175	
GA2	85-95%	KH 78-84 KD 74-82	170-180	4-7
GA3	95-100%	KH 88-100 KD 86-94	>180	6-9
Sprintausdauer	>100%	KH 120-140 KD 120-130	Max	>8
Wettkampfausdauer	100%	Max	Max	>8

SF = Schlagfrequenz; HF = Herzfrequenz; BLa = Blutlaktat; KH = Kajak Herren; KD = Kajak Damen; GA = Grundlagenausdauer

In der Forschung ist die Betrachtung der Intensitätsverteilung des Ausdauertrainings in Bezug auf diese Trainingszonen von großem Interesse, da angenommen wird, dass die Zeit, die ein Sportler in den Zonen verbringt und auch das Verhältnis dieser zueinander, unterschiedliche physiologische Anpassungen provoziert (vgl. 1.3.1). Abbildung 2 zeigt die wichtigsten trainingszonenspezifischen

physiologischen Anpassungen auf. Hier ist zu beachten, dass die wissenschaftliche Evidenz bis dato nur wenig Informationen liefert, welche Intensität die effektivste für die spezifische Verbesserung von bestimmten Parametern der Ausdauerleistungsfähigkeit ist (Jones & Carter, 2000), da die aufgeführten Anpassungen für alle Ausdauertrainingsformen beschrieben wurden. Insbesondere ein Training in Zone (Z) 1 (niedrigintensives kontinuierliches Ausdauertraining) und Z3 (hochintensives Intervalltraining) bewirkt vergleichbare physiologische Anpassungen, wobei in Abhängigkeit zur Intensität teilweise Tendenzen bezüglich der zu favorisierenden Trainingszone für bestimmte Anpassungen bestehen (vgl. Midgley et al., 2006). Grundsätzlich sind die zu erwartenden Anpassungen zudem von dem Trainingsstatus sowie einem adäquaten Belastungsreiz (Intensität, Dauer und Frequenz, etc.) der jeweiligen Trainingseinheit abhängig (Jones & Carter, 2000).

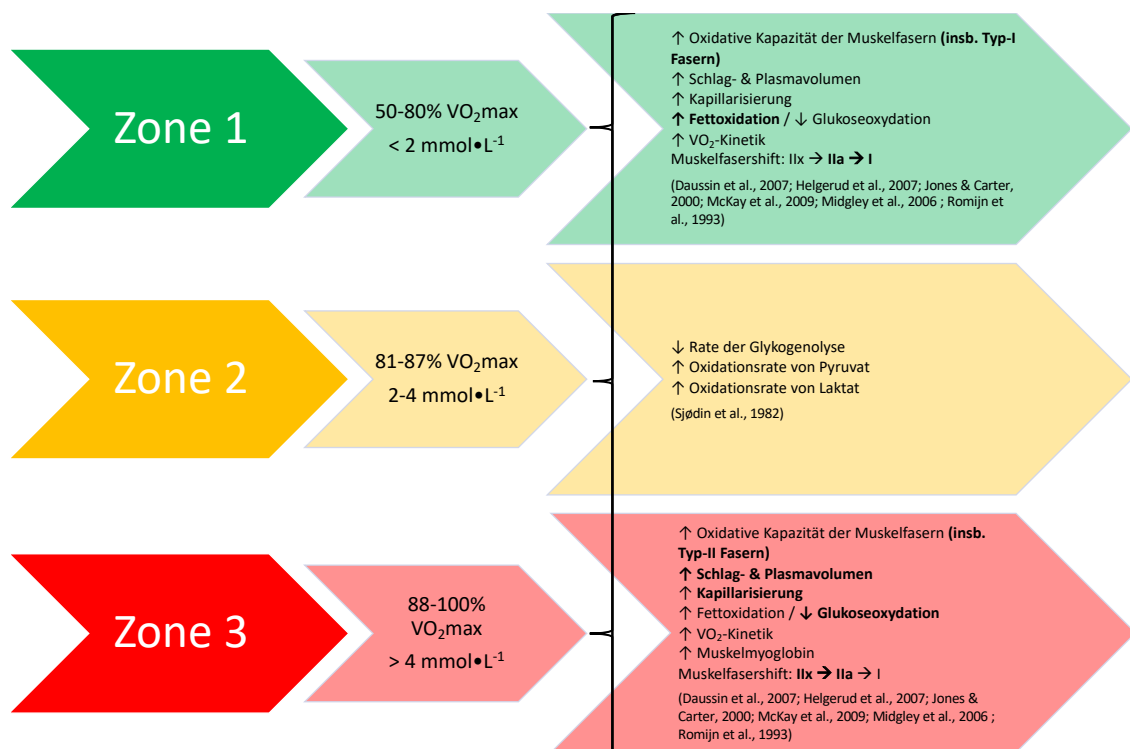


Abbildung 2. Die wichtigsten zonenspezifischen physiologischen Anpassungen in Bezug auf die Trainingsintensitäten nach dem Drei-Zonen-Modell (in Anlehnung an Seiler, 2010). (Diverse Anpassungen werden sowohl Training in Zone 3 als auch in Zone 1 zugesprochen, wobei die Evidenz für bestimmte Anpassungen Zone 1 oder Zone 2 favorisiert → **fett** geschrieben).

1.3.1. Theoretisches Konzept der Trainingssteuerung

In der Trainingswissenschaft gibt es diverse Konzepte und Modelle, die den Adaptationsprozess sowie den Trainingsprozess beschreiben. Die wohl grundlegendsten und bekanntesten Modelle der körperlichen Anpassung bzw. Reaktion auf Belastung sind unter anderem das Prinzip der Superkompensation (Verchoshanskij, 1990) und das Fitness-Fatigue-Modell (Banister et al., 1975). Diese bilden zudem auch die Grundlage der Modelle, die den Trainingsprozess beschreiben, wie es u.a. das kybernetische Modell (Zaciorskij, 1971) tut, das als ein theoretischer Eckpfeiler der Untersuchungen zur Trainingsintensität in der aktuellen Arbeit verstanden werden kann. Es dient im Allgemeinen als Begründung für das Trainingsmonitoring sowie für die zu erwartenden Zusammenhänge zwischen dem Training in verschiedenen Trainingszonen und den entsprechenden physiologischen Anpassungen, die mittels der unter 1.2 beschriebenen Leistungsdiagnostik festgestellt werden. Das Modell beschäftigt sich mit der Steuerung und Regelung des Trainingsprozesses (Hohmann et al., 2014). Es geht davon aus, dass es einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem durchgeführten Training, bzw. dem Belastungsreiz, und den daraus folgenden physiologischen Anpassungsprozessen gibt (Zaciorskij, 1971). Die zu erwartenden Anpassungen ergeben sich laut Modell aus der Belastbarkeit des Systems und den Reizen (Art, Intensität, Volumen, Dichte, Frequenz, etc.) denen es ausgesetzt ist (Letzelter, 1978). Daraus ergibt sich eine mathematische Beschreibbarkeit des Trainingsprozesses, wodurch dieser theoretisch präzise steuerbar ist (Carl, 1983; Schnabel, 2008). In Bezug auf die aktuelle Fragestellung im Monitoring der Trainingsintensität ist das Modell der kybernetischen Trainingsteuerung in Abbildung 3 dargestellt. Mittels Messung der Belastungsintensität innerhalb jeder einzelnen Trainingseinheit kann ein ständiger Soll-Ist-Vergleich zwischen der geplanten und der tatsächlich realisierten Verteilung der Trainingsintensität durchgeführt und in Relation zum Leistungsstand gebracht werden. In einem ständigen Evaluierungsprozess zwischen geplantem und realisiertem Training sowie der Leistungsentwicklung kann dann entschieden werden, inwiefern im aktuellen Trainingsprozess Änderungen vorgenommen werden sollen/müssen. Im Rahmen dieses Regelkreises kann man somit stets auf Einflüsse/Störfaktoren reagieren, um die geplanten Leistungsanpassungen zu sichern. Aus diesem

Regelkreismodell der Trainingssteuerung bildet sich die retrospektiv zu beobachtende Verteilung der Trainingsintensität, wie sie im Rahmen dieser Arbeit diskutiert wird. Es muss jedoch kritisch hinterfragt werden, inwiefern die kybernetische Trainingssteuerung einen wissenschaftlichen Mehrwert liefert, bedenkt man die Komplexität des Trainingsprozesses und der Einflussfaktoren auf den Prozess sowie die physiologischen Anpassungsmechanismen (Hohmann & Lames, 2002). Die Grenzen des kybernetischen Modells bei der Erstellung von Trainingsvorgaben stellen sich in der Praxis durch teilweise sehr große inter- sowie intraindividuelle Schwankungen der akuten physiologischen Belastungsantwort sowie chronischen physiologischen Adaptationen sowie Leistungsanpassungen dar (Joyner & Lundby, 2018; Zinner et al., 2018).

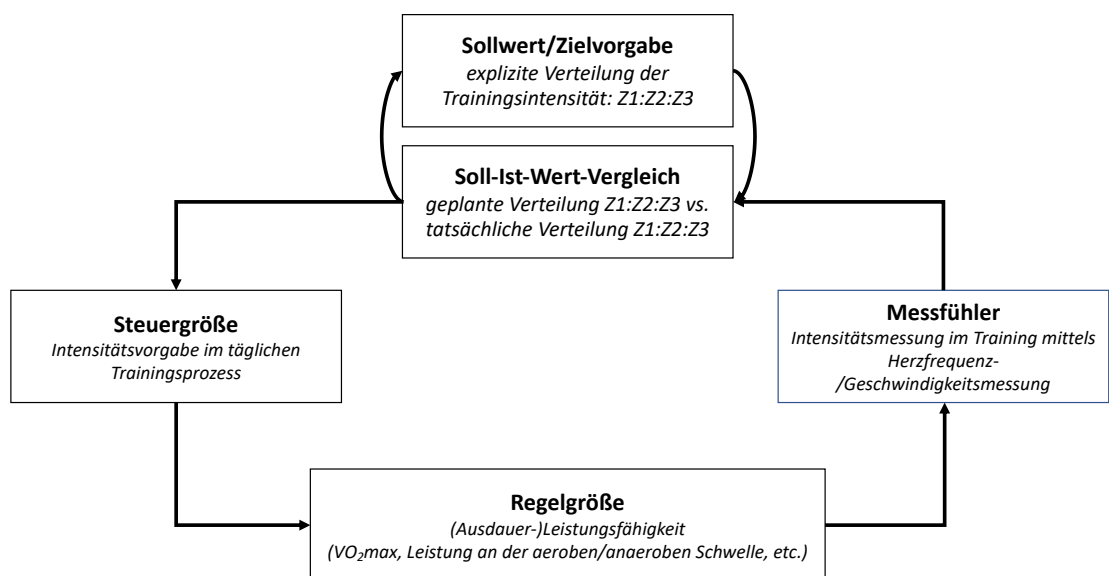


Abbildung 3. Modell der kybernetischen Trainingssteuerung (modifiziert nach Hohmann et al., 2014)

1.4. Verteilung der Trainingsintensität im Ausdauersport

Untersuchungen in verschiedenen Sportarten zeigen, dass der größte Anteil im niedrig-intensiven Bereich absolviert wird [70-94% in Z1] (Stöggl & Sperlich, 2015). Die Verteilung in die anderen beiden Intensitätsbereiche variiert je nach Sportart und Saisonphase (Campos et al., 2021; Guellich et al., 2009; Kenneally et al., 2020; Stöggl & Sperlich, 2015; Treff et al., 2017). Der Anteil im „Schwellenbereich“ (Z2) liegt bei 4-22% und der Anteil hoch-intensiven Trainings bei 2-11% (Stöggl & Sperlich, 2015). In der Literatur wird je nach aufgewendeter Trainingszeit in sogenannte pyramidale ($Z1 > Z2 > Z3$) oder polarisierte ($Z1 > Z3 > Z2$) Trainingsintensitätsverteilungen (engl. *Training intensity distribution*; TID) unterschieden (Stöggl & Sperlich, 2015).

Der Großteil retrospektiver Studien zur TID in verschiedenen Ausdauersportarten fand für Rudern (Guellich et al., 2009; Hartmann et al., 1990; Plews et al., 2014), Radrennsport (Lucía et al., 2000; Schumacher & Mueller, 2002; Zapico et al., 2007), Schwimmen (Baldassarre et al., 2019; Mujika et al., 1995), Laufen (Esteve-Lanao et al., 2005), Triathlon (Neal et al., 2011) und Skilanglauf (Torvik et al., 2021) eine pyramidale TID mit >70% des Trainings in Z1. Einige retrospektive Analysen zeigen jedoch auch eine polarisierte Struktur bei erfolgreichen Skilangläufern (Sandbakk et al., 2011; Schmitt et al., 2020; Seiler & Kjerland, 2006; Tønnessen et al., 2014), Läufern (Billat, 2001) und Ruderern (Bourgois et al., 2014). Bei gut trainierten Ausdauerläufern konnte in einer 16-wöchigen prospektiven Interventionsstudie aufgezeigt werden, dass eine gemischte Struktur der Intensitätsverteilung (bei der 8 Wochen polarisiertes Training [POL] auf 8 Wochen pyramidales Training [PYR] folgten) einer reinen polarisierten bzw. reinen pyramidalen sowie einer POL→PYR in der Ausbildung diverser Leistungsparameter (VO_{2peak} , $vBLa2$, $vBLa4$, 5km-Lauf) überlegen ist (Filipas et al., 2021). Ein Trainingsexperiment im Rudern, das der Sportart Kanu am nächsten kommt, zeigt, dass vor allem die Manipulation der Anteile von Z3 zu unterschiedlichen Anpassungen der Ruderleistungsfähigkeit führt (Treff et al., 2017). Dies macht deutlich, dass die Analyse der TID eine wesentliche Kenngröße in der mittel- und langfristigen Trainingsplanung und auch -steuerung darstellt.

Bei der Interpretation prospektiver Studienergebnisse muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese in der Regel nicht dem realen Trainingsalltag entsprechen. So

stellen sie mit einer Dauer von wenigen Wochen bis Monate lediglich eine Momentaufnahme der Trainingsphase dar, wobei unklar ist, ob die Ergebnisse auch auf längere Zeiträume (komplette Saison, Olympiazzyklus, etc.) zutreffen. Zudem wird der Trainingsalltag in der Regel künstlich verändert, um Einflüsse auf die Studienergebnisse zu minimieren, was aber nicht der Realität entspricht. Beispielsweise haben die Läufer in der Studie von Filipas et al. (2021) neben dem Lauftraining keine weiteren Trainingsinhalte (Krafttraining, Rumpfttraining unspezifisches Ausdauertraining, etc.) absolviert, was heutzutage untypisch für das Training von hochtrainierten Läufern ist.

Grundsätzlich stellt die Suche nach der optimalen Verteilung der Trainingsintensität im Ausdauersport, insbesondere in Bezug auf das polarisierte Training, momentan eine in der Wissenschaft viel debattierte Thematik dar (Burnley et al., 2022; Foster et al., 2022). Im Rahmen dieser Debatte, bei der in den letzten Jahren vor allem das polarisierte Training als vorteilhaft gegenüber dem pyramidalen Training dargestellt wurde (Seiler, 2010; Seiler & Kjerland, 2006; Tønnessen et al., 2014), hat sich jedoch ein grundlegender Konsens gebildet. So zeigen selbst die Verfechter des polarisierten Trainings auf, dass neben den hohen Anteilen des Trainings in Z1, die optimale Verteilung der restlichen Trainingszeit auf Z2 und Z3 von diversen Faktoren wie der Wettkampfbelastung, dem Trainingsstatus, der Saisonphase u.v.m. abhängt und somit sowohl eine polarisierte, wie auch pyramidale Struktur annehmen kann (Foster et al., 2022; vgl. Abbildung 4). Diese Aussage geht mit derer der Verfechter einer konträren Ansicht zur rein polarisierten Intensitätsstruktur einher, die für eine optimierte physiologische Anpassung auf die Notwendigkeit einer Balance zwischen langandauernden niedrigintensiven und kürzeren Belastungen mit höheren Intensitäten zur Minimierung des Risikos der Überlastung hinweisen (Burnley et al., 2022).

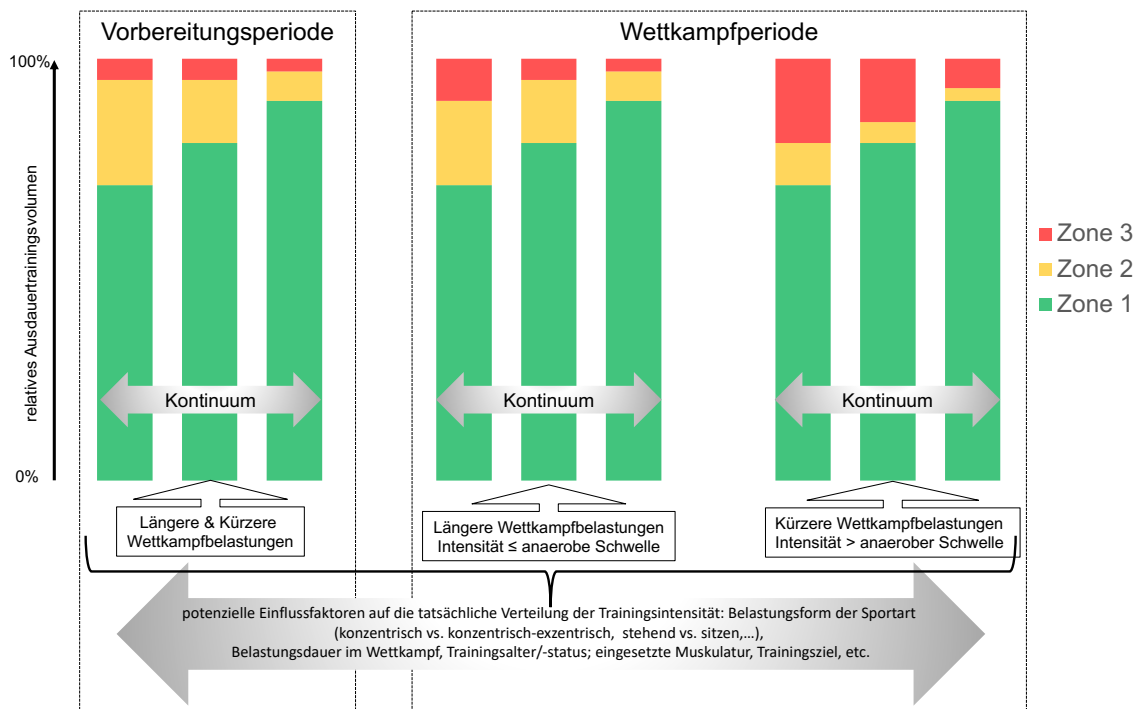


Abbildung 4. Modell zum Kontinuum der Verteilung der Trainingsintensität im Ausdauersport und deren Einflussfaktoren nach aktuellem wissenschaftlichen Konsens.

1.5. Trainingsintensität im Kanurensport

Leider fehlt bislang eine engmaschige Analyse der TID im Kanurensport gänzlich. Die Rahmentrainingskonzeption (RTK) des DKV sieht vor, dass 85 bis 90% des spezifischen Gesamttrainingsumfangs im Bereich der Grundlagenausdauer 1, 8%-10% im Bereich Grundlagenausdauer 2 und die restliche Trainingszeit im Bereich Grundlagenausdauer 3 und höheren Intensitäten absolviert werden soll (Kahl, 2005). Damit wird eine pyramidale TID angestrebt.

Ein Vergleich mit den Trainingszonen für Ausdauersportler nach Seiler (2010) (Tabelle 1 & Abbildung 2) macht deutlich, dass die durch den DKV angestrebte Intensitätsverteilung deutlich intensiver ausgelegt ist. Während Laktatwerte von 2,5 bis 4,0 mmol·L⁻¹ in den beschriebenen Modellen mit drei- bzw. fünf Zonen intensiven Trainingsbelastungen bzw. dem Schwellentraining entsprechen (vgl. Tabelle 1 & Abbildung 2), spiegelt dieser Laktatwertbereich nach DKV den aeroben Trainingsbereich, also die niedrigste trainingsreizrelevante Intensität, wider.

Hierbei muss man allerdings berücksichtigen, dass die Intensitätszonen nach Seiler (2010) für Ausdauersportarten mit hohem Belastungsanteil der Beinmuskulatur ausgelegt sind. Im Kanu hingegen wird die Vortriebsarbeit vorrangig mit der

Oberkörpermuskulatur durchgeführt und diverse Forschungsergebnisse weisen auf physiologische Unterschiede der Muskulatur von Oberkörper und Unterkörper hin. Neben der allgemein bekannten größeren Muskelmasse und dem höheren Anteil von Typ-I Muskelfasern im Unterkörper verglichen mit dem Oberkörper (Haff & Triplett, 2015), konnte dargestellt werden, dass die Armmuskulatur eine höhere Glukoseausnutzung und eine höhere Laktatbildung als die Beinmuskulatur aufweist. Dies ist vermutlich an Unterschieden in der lokalen Zirkulations- und Diffusionskapazität zwischen Arm- und Beinmuskulatur begründet (Calbet et al., 2005; Helge, 2010). Ebenso konnte bei gleichsam trainierter Arm- und Beinmuskulatur von Skilangläufer:innen eine höhere Kapazität der Fettoxidation in den Beinen festgestellt werden, die sich nicht durch Trainingsstatus oder Muskelfasertypverteilung erklären ließ und somit auf Unterschiede im Metabolismus zwischen Arm- und Beinmuskulatur hinweist (Ørtenblad et al., 2018). Eine weitere Untersuchung von Skilangläufer:innen mit gleichsam trainierter Ober- und Unterkörpermuskulatur konnte darstellen, dass die Kapazität der Kraftentfaltung bei Typ-I-, nicht aber bei Typ-II-Muskelfasern im *M. triceps brachii* größer ist als im *M. vastus lateralis* (Gejl et al., 2021). Außerdem konnte in der Studie aufgezeigt werden, dass in den Typ-I-Fasern im *M. triceps brachii* ca. 20% weniger Ca^{2+} (Calcium Ionen) als im *M. vastus lateralis* nötig waren, um 50% der maximalen Kraft in der Muskelfaser zu entfalten. Dies entspricht einer erhöhten Ca^{2+} -Sensivität der Typ-I-Muskelfasern des *M. triceps brachii* (Gejl et al., 2021). Die diversen Unterschiede zwischen der Ober- und Unterkörpermuskulatur weisen darauf hin, dass unterschiedliche qualitative wie quantitative Trainingsstimuli für verschiedene Anpassungen der unterschiedlichen Muskelgruppen notwendig sind. Somit scheint es möglich, dass die zuvor beschriebenen Intensitätseinteilungen aus dem Ausdauersport für den Kontext des Trainings im Kanurennsports nicht extrapolierbar sind und somit andere Strukturen der Intensitätsverteilung in der Praxis im Kanurennsport erfolgsversprechend sind.

Die bis dato einzigen prospektiven Trainingsstudien, die den Effekt von verschiedenen Trainingsintensitätsverteilungen in hochtrainierten Kajakfahrern untersucht haben (García-Pallarés et al., 2009, 2010), zeigten positive Effekte für ein Training mit Schwerpunkt in Z2 und Z3, die vergleichbar mit pyramidalen oder polarisierten TID in unterkörperbetonten Sportarten sind. Die Probleme der Aussagekraft solcher prospektiven Studien wurden bereits aufgezeigt (vgl. 1.4).

Eine retrospektive Analyse der Trainingsintensitätsverteilung im Kanurennsport über den gesamten Verlauf einer Saison wurde zum jetzigen Zeitpunkt hingegen noch nicht wissenschaftlich untersucht. Daraus ergibt sich ein eindeutiger Forschungsbedarf zur Ist-Verteilung der Trainingsintensität im Kanurennsport, um wissenschaftlich fundierte Aussagen zur Soll-Verteilung erarbeiten zu können.

1.6. Quantifizierungsmethoden der Trainingsintensität

Um die Stressantwort des Körpers auf Belastung zu quantifizieren (interne Belastung) wird in der Praxis in der Regel die Herzfrequenz (HF), der Blutlaktatspiegel (BLa) oder RPE herangezogen (D. Bishop, 2000; Borges et al., 2014; Bullock et al., 2013; Paquette et al., 2020; van Someren & Oliver, 2002). HF und BLa zeigen jedoch hohe intra-individuelle Schwankungen (Bagger et al., 2003). Die HF hat sich zudem aufgrund ihrer kinetischen Trägheit in Reaktion auf plötzliche Belastungsänderungen nicht als valide Methode zur Abbildung hoch-intensiver Belastungen erwiesen (Halson, 2014; Hogan et al., 2019, 2020; D. Sanders et al., 2017; Vogt et al., 2006). RPE wird u.a. durch individuelle Eigenschaften der Athlet:innen (Alter, Geschlecht, Fitness, Leistungsstand, etc.), die Umgebungsbedingungen (Temperatur, etc.) und weitere physische sowie psychosoziale Faktoren beeinflusst (Borresen & Lambert, 2009; Haddad et al., 2014, 2017; Maw et al., 1993). In Anbetracht dieser Anwendungsgrenzen interner Parameter zur Darstellung der Stressantwort des Körpers auf Belastung scheinen diese zur akkuraten Bestimmung der Trainingsbelastung nur bedingt geeignet. Die unzureichende Datenlage in diesem Feld im Kanurennsport macht weitere Forschung notwendig. Hierbei müssen die internen Messparameter zudem auch mit Methoden verglichen werden, die die Belastung über externe Belastungsparameter (Geschwindigkeit, Kraft, etc.) analysieren.

Für die Quantifizierung externer Belastungsparameter werden im Kanurennsport Akzelerometer und GPS-Empfänger genutzt, die u.a. Schlagfrequenz, Bootsgeschwindigkeit sowie zurückgelegte Distanz aufzeichnen (Borges et al., 2014; García-Pallarés et al., 2009, 2010). Jedoch weisen auch diese Methoden Schwächen auf. So werden Trainingszonen bei der Quantifizierung über die Schlagfrequenz in der Regel über verallgemeinerte Frequenzbereiche bestimmt, die

die Individualität in Bezug auf die Paddeltechnik oder das Fitnesslevel der/des Athleten:innen nicht berücksichtigen (Bullock et al., 2013). Außerdem spiegelt die Schlagfrequenz nicht die physiologischen und mechanischen Belastungen während des Paddelns wider, da der/die Athlet:in die Möglichkeit hat die Intensität bei einer bestimmten Frequenz zu variieren [Stichwort: schlagvortriebbetontes Paddeln] (Bell et al., 1998). Äußere Faktoren wie Wind, Wellen und Strömung beeinflussen zusätzlich die Intensität bei einer konstanten Schlagfrequenz. Die Geschwindigkeitsmessung via GPS wird ebenso durch äußere Bedingungen wie Luft-/Wassertemperatur, Wind, Wellen und Strömung beeinflusst (Bullock et al., 2013). Da viele Kanurennsportler:innen auf Fließgewässern trainieren, variiert die Geschwindigkeit teilweise stark in Abhängigkeit davon, ob flussaufwärts oder -abwärts gepaddelt wird.

1.7. Fazit

Für die Optimierung der Diagnostik sowie Trainingsplanung und -auswertung für Trainer:innen und Athlet:innen im Kanurennsport ist es notwendig, die vorhandenen Methoden der Intensitätsquantifizierung auf dem Wasser besser zu verstehen. Mit Blick auf Vor- und Nachteile von laborbasierter und feldbasierter Diagnostik sowie die verschiedenen Methoden der Intensitätsbestimmung (intern vs. extern) besteht ein Forschungsbedarf zur Klärung des Mehrwertes von Ergometer-Testungen für die Belastungsbestimmung des Trainings im Boot auf dem Wasser und zur Klärung der Frage, inwiefern die unterschiedlichen Methoden der Intensitätsbestimmung für die Quantifizierung des Trainings herangezogen werden können.

1.8. Problemdarstellung

Bis dato gibt es keine wissenschaftlichen Studien, die die tatsächliche TID im Kanurennsport retrospektiv über längere Zeiträume/Trainingsperioden analysieren. Insofern beruhen die Informationen zur Trainingsintensität im Kanuleistungssport auf Untersuchungen aus Sportarten, die entweder durch Ganzkörperbelastung (z.B. Rudern, Skilanglauf) oder vorrangige Unterkörperbelastung (z.B. Laufen,

Radfahren) gekennzeichnet sind. Allein die physiologischen Unterschiede zwischen der Oberkörper- und Unterkörpermuskulatur lassen jedoch darauf schließen, dass die TID im Kanurennsport, aufgrund der vorrangigen Vortriebsarbeit durch die oberen Extremitäten, quantitativ sowie qualitativ von Sportarten die vorrangig die unteren oder auch alle Extremitäten einschließen, abweicht.

Zur Minimierung des Einflusses der diversen Umwelteinflüsse auf die Leistung im Kanurennsport wurden in der Vergangenheit primär laborbasierte Leistungsdiagnostiken auf Ergometern in der Wissenschaft eingesetzt. Untersuchungen lassen jedoch vermehrt Zweifel aufkommen, inwiefern Ergometerbasierte Leistungsdiagnostiken einen Mehrwert für die Praxis darstellen, da sowohl physiologisch als auch kinematisch Unterschiede zwischen Kanufahren auf dem Wasser und dem Ergometer bestehen. Für eine adäquate Bestimmung von Trainingszonen für die Analyse von Trainingsintensitäten ist eine valide und realitätsnahe Leistungsdiagnostik jedoch von großer Bedeutung.

Außerdem weisen die vorhandenen Methoden zur Quantifizierung der Trainingsbelastung individuelle Stärken und Schwächen auf. Eine valide und objektive Einschätzung der individuellen Trainingsbelastung von Athlet:innen ist für die retrospektive Analyse als auch für die zielgerichtete Planung der Trainingsbelastung von enormer Bedeutung.

1.9. Zielstellung und Vorgehen

Ziel der vorliegenden kumulativen Dissertation war es, erste wissenschaftliche Erkenntnisse zur TID und deren Quantifizierungsmethode in der, durch die Oberkörpermuskulatur angetriebenen, Sportart Kanurennsport zu gewinnen und diese mit dem Wissensstand aus Sportarten, die obere und untere Extremitäten (z.B. Biathlon, Rudern) bzw. vorrangig die unteren Extremitäten (z.B. Radsport, Laufen) für den Vortrieb einsetzen, abzugleichen.

Studie 1 untersuchte zunächst, inwiefern eine laborbasierte Leistungsdiagnostik einer feldbasierten im Kanurennsport entspricht und welche diagnostischen Parameter Zusammenhänge mit der Leistung im Wettkampf aufweisen. Auf dieser Grundlage wurde die Diagnostik für die Folgestudien gewählt.

In *Studie 2* wurde dann retropektiv analysiert, wie sich die Intensitätsverteilung des spezifischen Wassertrainings von Kanurennsportler:innen bei Betrachtung einer physiologisch basierten TID-Quantifizierung über eine Saison darstellt. Anschließend wurden in *Studie 3* die TID-Quantifizierungsmethoden basierend auf physiologischen Parametern mittels Herzfrequenz- sowie Geschwindigkeitsanalyse und auf der Wettkampfleistung mittels Geschwindigkeitsanalyse in der Wettkampfphase verglichen.

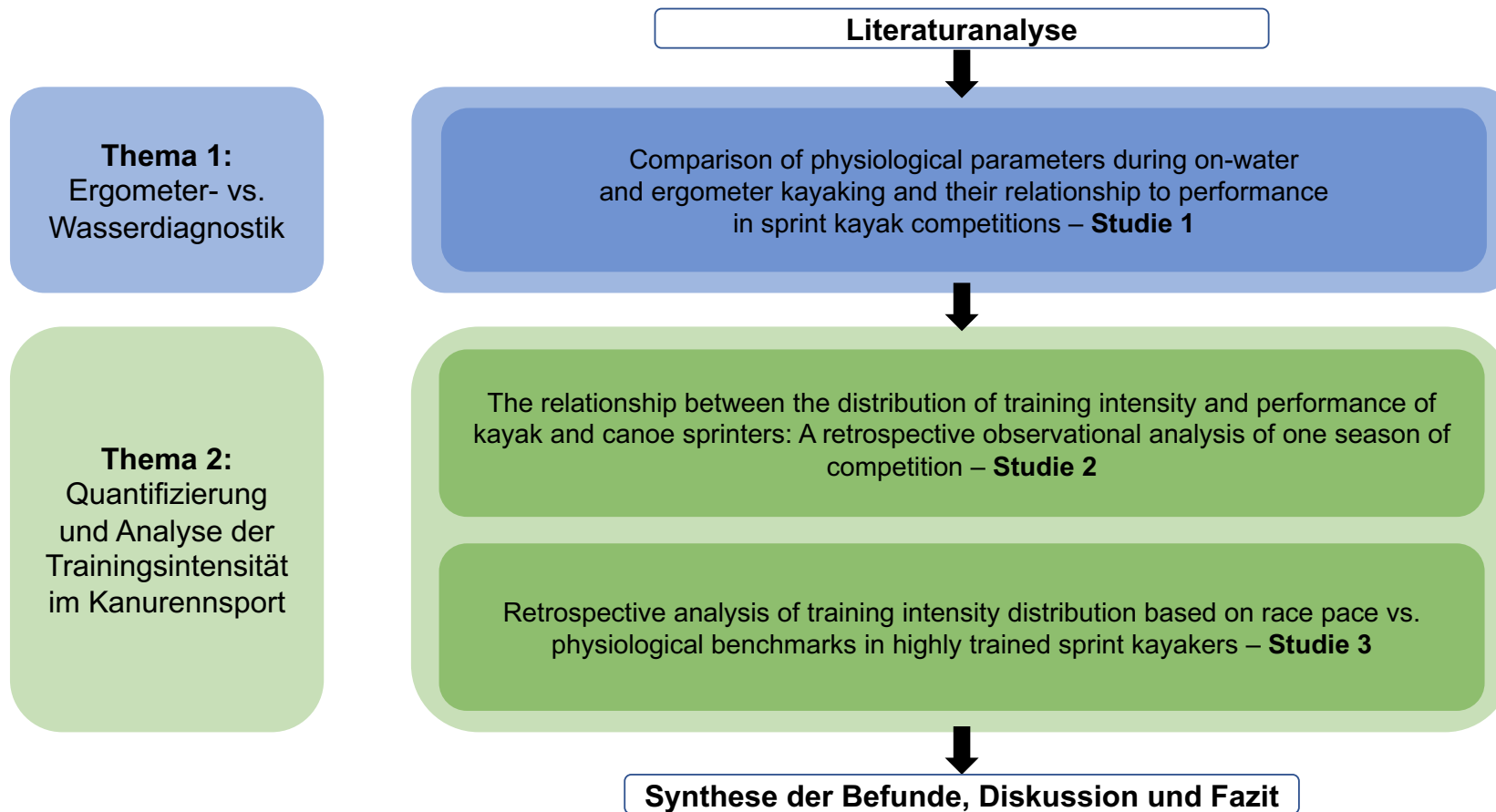
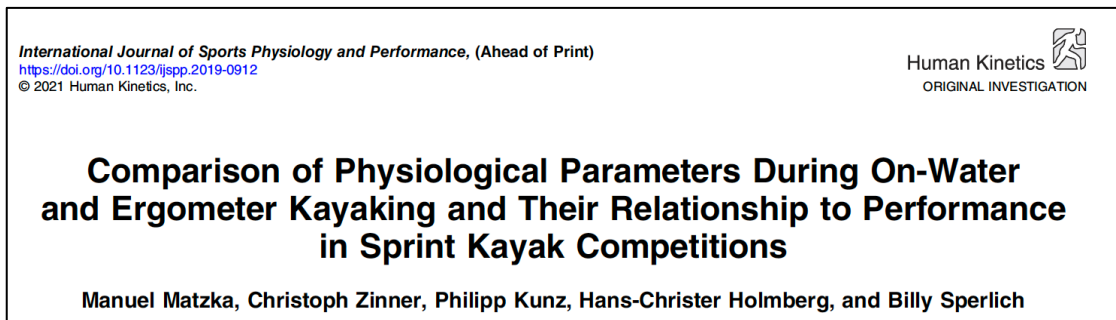


Abbildung 5. Übersicht der Themen und Studien.

2. Einzelstudien

2.1. Studie 1: *Comparison of physiological parameters during on-water and ergometer kayaking and their relationship to performance in sprint kayak competitions*



2.1.1. Problemdarstellung

Für die drei olympischen Wettkampfdistanzen im Kanurensport ist die aerobe Leistungsfähigkeit der Athlet:innen wesentlich für den Erfolg, wobei die VO_{2max} gemessen während Kanu-Ergometer Stufentests eine starke Korrelation mit der 200 m sowie 1000 m Leistung auf dem Wasser aufweist (Borges et al., 2015). Untersuchungen der peripheren Oxygenierung des *M. latissimus dorsi*, *M. biceps brachii* sowie des *M. vastus lateralis* bei Ergometer Stufentests stellten sich, verglichen mit der VO_{2max} , sogar als noch stärkere Prädiktoren der Zeitfahrleistung auf dem Wasser dar. Anaerobe Leistungsparameter wie die Leistung an der anaeroben Laktatschwelle während Kanu-Ergometer Stufentests weisen ebenso eine starke Korrelation mit spezifischen Zeitfahrleistungen auf dem Wasser auf (D. Bishop, 2000; Borges et al., 2015). Insofern bietet eine umfassende Leistungsdiagnostik von der VO_{2max} , der Muskeloxygenierung der Arbeitsmuskulatur sowie der anaeroben Schwelle im Kanurensport eine wichtige Grundlage für das Monitoring der Leistungsentwicklung sowie für die angemessene Anpassung des Trainings. Eine Schwäche der bisherigen leistungsdiagnostischen Untersuchungsmethoden ist, dass die Diagnostiken fast ausschließlich auf Kanu-Ergometern durchgeführt wurden. Die Einflüsse verschiedener Umweltfaktoren

(Temperatur, Wind, Wellen, etc.) auf dem Wasser bergen ein großes Potential für Abweichungen zwischen den Belastungsformen.

Bisherige wissenschaftliche Untersuchungen der physiologischen Reaktion und der Bewegungstechnik im Vergleich zwischen Kanufahren auf dem Wasser und auf dem Ergometer zeigen kontroverse Ergebnisse. Einige Studien fanden vergleichbare Reaktionen in Bezug auf die O₂-Aufnahme, BLa, HF, und RPE zwischen Wasser- und Ergometerbelastungen (Carrasco Páez et al., 2010; Mitchell, 1998; Winchcombe et al., 2019). Andere Forschungsergebnisse wiesen hingegen Unterschiede in Bezug auf Bewegungstechnik, Muskelrekrutierung, Schlagfrequenzprofil und BLa auf (Barnes & Adams, 1998; Fleming, Donne, & Fletcher, 2012; Fleming, Donne, Fletcher, et al., 2012; Villarino-Cabezas et al., 2013). Keine der genannten Studien hat jedoch alle der zuvor genannten leistungsrelevanten physiologischen Parameter gemeinsam analysiert. Das übergeordnete Ziel einer Leistungsdiagnostik sollte es sein eine hochwertige Aussage über den Leistungsstand bei den Parametern zu ermöglichen, die mit der spezifischen Wettkampfleistung die größten Zusammenhänge aufweisen. Es existieren jedoch bisher keine vergleichenden wissenschaftlichen Untersuchungen zwischen Wasser- und Ergometerdiagnostiken, die deren individuelle Aussagekraft in Bezug auf die spezifische Wettkampfleistung analysieren.

Infolgedessen zielte *Studie 1* darauf ab, die physiologischen Reaktionen (O₂-Aufnahme, periphere Muskeloxygenierung, BLa, HF) zwischen einem Wasser- und Ergometerstufentest zu vergleichen und deren Zusammenhang mit der tatsächlichen Wettkampfleistung im Kanurennsport zu untersuchen.

2.1.2. Untersuchungsdesign

Vierzehn hochtrainierte männliche (n = 8) und weibliche (n = 8) Kanurennsportler:innen (alles Kajakfahrer:innen) (Alter: 19,0 ± 3,6 Jahre; Größe: 180 ± 10,4 cm; Gewicht: 76,0 ± 12,1 kg; höchste VO₂ über ein 30-s Intervall (VO_{2peak}): 4,0 ± 1,0) führten an zwei aufeinander folgenden Tagen in randomisierter Reihenfolge jeweils einen 5 x 1500 m Stufentests auf dem Wasser (internationale Regattabahn Duisburg-Wedau) und auf dem Kajak-Ergometer (Dansprint ApS, Hvidovre; Dänemark) durch. Für die Analyse der Zusammenhänge zwischen den

gemessenen physiologischen und Leistungsparametern während der Stufentests und der Wettkampfleistung (200, 500 und 1000 m) wurden die Tests in unmittelbarer Nähe (ein bis zwei Wochen später) zu einem offiziellen Wettkampfhöhepunkt (Westdeutsche Meisterschaft oder Deutsche Meisterschaft) durchgeführt.

Die Intensität der Stufen wurde in Relation zur maximalen HF (HF_{max}) gesteuert (% von HF_{max}). Die Werte für die einzelnen Stufen wurden mittels HF-Monitor gesteuert und lagen bei ca. 60, 70, 80, 90 und 100% der HF_{max} . Sie waren für die beiden Tests identisch.

Während der Belastung wurden kontinuierlich kardio-respiratorische Parameter mittels mobiler Spirometrie (MetaMax 3B, Cortex, Leipzig, Germany) und HF-Monitor (Polar V800 mit Polar Wear Link System, Polar Electro Oy, Kempele, Finnland) sowie die Muskeloxygenierung am *M. biceps brachii* mittels portablen Nahinfrarotspektroskopie-Geräts (Portamon, Artinis Medical System, Zetten, Niederlande) gemessen. Kapillarblut wurde vor Belastungsbeginn und unmittelbar nach jeder Belastungsstufe vom rechten Ohrläppchen zur BLa-Analyse (Lactate Pro 2; Arkray KDK, Kyoto, Japan) abgenommen. RPE wurde zu denselben Zeitpunkten mittels Borg Skala (6-20) abgefragt. Zudem wurde während dem Ergometer-Test die Leistung (Dansprint PRO touch computer, Dansprint ApS, Hvidovre, Dänemark) aufgezeichnet und im Nachgang die Leistung bei einem BLa von 2 und 3 $mmol \cdot L^{-1}$ anhand linearer Interpolierung berechnet.

Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung mit anschließendem Tukey post-hoc Test wurde angewendet, um die Reaktion der einzelnen Messvariablen über die einzelnen Stufen des Stufentests auf dem Wasser und auf dem Ergometer zu vergleichen. Die statistische Signifikanz wurde bei einem Alpha-Wert von $p \leq 0,05$ festgelegt. Die Effektstärke wurde anhand von Cohen's *d* berechnet (Cohen, 1988). Die Korrelation der gemessenen Parameter mit der Wettkampfleistung wurde mittels Pearsons' Korrelationskoeffizienten berechnet.

2.1.3. Zusammenfassende Ergebnisdarstellung

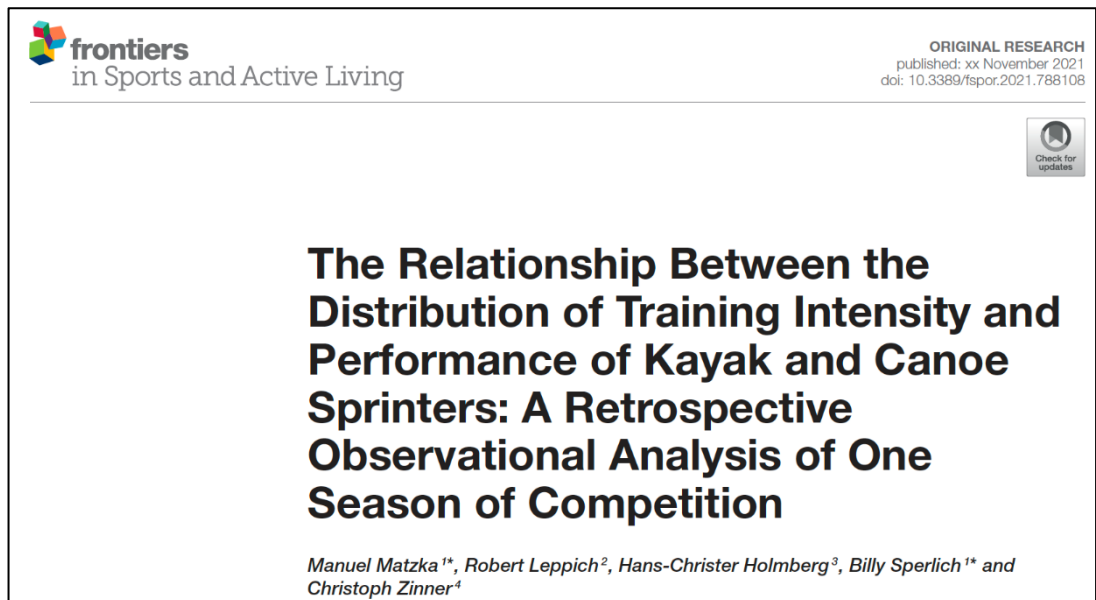
Die VO_{2peak} des Stufentests auf dem Wasser war in der vorletzten ($p = 0,02$; $d = 0,32$) und letzten ($p < 0,001$; $d = 0,32$) Belastungsstufe höher als auf dem Ergometer. Die Muskeloxygenierung des *M. biceps brachii* war in der letzten Belastungsstufe des Ergometer-Tests ca. 21% höher als auf dem Wasser ($p = 0,002$; $d = 0,90$). Während den submaximalen Belastungsstufen 2 ($p = 0,01$; $d = 0,78$), 3 ($p = 0,005$; $d = 0,91$) und 4 ($p = 0,005$; $d = 1,01$) lag der RPE-Wert bei der Ergometerbelastung höher als auf dem Wasser. Keine Unterschiede zwischen den Belastungsformen zeigten sich für BLa, den Respiratorischen Quotienten, die Ventilation und die Atemfrequenz.

Die VO_{2peak} zeigte starke Korrelationen sowohl für die Wasserdiagnostik als auch für die Ergometerdiagnostik mit der Wettkampfleistung über alle drei Wettkampfstrecken (in allen Fällen: $r > 0,76$; $p \leq 0,01$). Auch die Leistung bei 2 sowie 3 $mmol \cdot L^{-1}$ BLa wies hohe Korrelationen mit den Leistungen über alle drei Wettkampfstrecken auf (in allen Fällen: $r > 0,73$; $p \leq 0,01$). Die stärkste und nahezu perfekte Korrelation wies die Leistung in der letzten Stufe des Ergometertests mit allen drei Wettkampfstrecken auf (200 m: $r = 0,88$; 500 m $p = 0,93$; 1000 m: $r = 0,86$; in allen Fällen $p < 0,001$).

2.1.4. Kurzfazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Stufentest auf einem Kanu-Ergometer ebenso gut mit der Wettkampfleistung korreliert wie eine Diagnostik auf dem Wasser. Unterschiede in der VO_2 bei hohen Intensitäten wie auch bei der Muskeloxygenierung des *M. biceps brachii* in der Ausbelastung weisen jedoch darauf hin, dass die Ergometer Belastung die Belastung im Boot auf dem Wasser nicht akkurat imitiert. Somit sollte eine Kanu-Ergometer basierte Diagnostik als Grundlage für Trainingsempfehlungen mit Vorsicht eingesetzt werden, insbesondere wenn es um darum geht, Trainingsintensitäten anhand der VO_2 zu bestimmen.

2.2. Studie 2: *The Relationship Between the Distribution of Training Intensity and Performance of Kayak and Canoe Sprinters: A Retrospective Observational Analysis of One Season of Competition*



2.2.1. Problemdarstellung

Der Großteil retrospektiver Analysen der TID in Ausdauersportarten, wie Rudern (Guellich et al., 2009; Hartmann et al., 1990; Plews et al., 2014), Radfahren (Lucía et al., 2000; Neal et al., 2013; Schumacher & Mueller, 2002; Zapico et al., 2007), Skilanglauf (Torvik et al., 2021), Schwimmen (Baldassarre et al., 2019; Mujika et al., 1995), Laufen (Esteve-Lanao et al., 2005), Triathlon (Neal et al., 2011) zeigt eine pyramidale Struktur, wobei >70% des Trainings in Z1 absolviert wird, mit jeweils geringer werdenden Anteilen in Z2 und Z3 [$Z1 > Z2 > Z3$] (Stöggl & Sperlich, 2015). Jedoch finden sich vermehrt Hinweise in der Forschung, dass erfolgreiche Sportler in Sportarten wie Skilanglauf (Sandbakk et al., 2011; Schmitt et al., 2020; Seiler & Kjerland, 2006; Tønnessen et al., 2014), Laufen (Billat, 2001) und Rudern (Bourgeois et al., 2014) eine polarisierte TID anwenden, die neben einem sehr hohen Anteil des Trainings in Z1 einen relativ hohen Anteil des Trainings in Z3 und einen eher geringen Anteil in Z2 ($Z1 > Z3 > Z2$) aufweist (Stöggl & Sperlich, 2015).

Die Anwendbarkeit dieser Forschungsergebnisse zur TID im Ausdauersport auf die Sportart Kanurennsport ist jedoch fragwürdig, da die bisherige Forschung

ausschließlich Sportarten untersucht hat, in der entweder primär die Muskulatur des Unterkörpers oder aber die von Unter- und Oberkörper zusammen an der Vortriebsgenerierung beteiligt sind.

Kanurennsportler:innen treiben das System aus Athlet:in und Boot fast ausschließlich mit Hilfe der vergleichsweise kleinen Oberkörpermuskulatur gegen den Wasserwiderstand an (Ualí et al., 2012). Ober- und Unterkörpermuskulatur unterscheiden sich substanziell mit Blick auf die Gesamtmasse, die Faserzusammensetzung, die kontraktilen Eigenschaften der Muskelfasern, die Fähigkeit Sauerstoff zu extrahieren als auch die Glukose- und Fettoxidation (Calbet et al., 2005; Gejl et al., 2021; Helge, 2010; Ørtenblad et al., 2018; van Hall et al., 2003; Zinner et al., 2016). Somit ist zu vermuten, dass sich ein Training für optimale Leistungsanpassungen der Oberkörpermuskulatur qualitativ wie auch quantitativ von dem der Unterkörpermuskulatur unterscheidet.

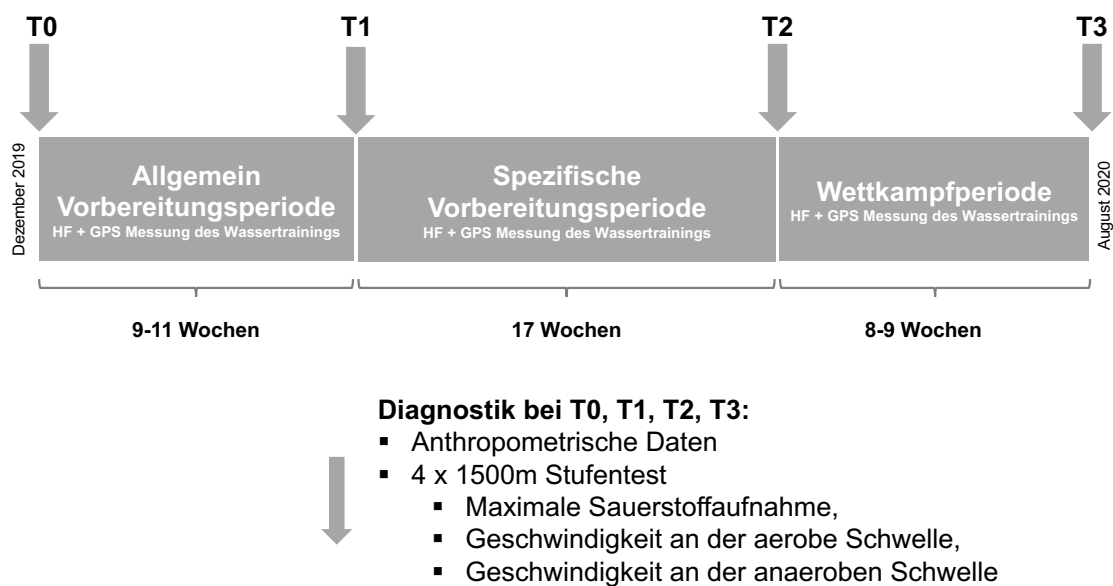
Bisher gibt es im Kanurennsport lediglich zwei prospektive Untersuchungen der Trainingsintensitätsverteilung, die mit einem Trainingsschwerpunkt in Z2 und Z3 vergleichbare Effekte auf diverse Leistungsparameter zeigten, wie ein pyramidales oder polarisiertes Training in den oben aufgeführten Sportarten (García-Pallarés et al., 2009, 2010). Prospektive Trainingsinterventionen wie diese sind jedoch eher kurz und verändern oftmals künstlich den typischen Trainingsalltag. Außerdem wurden die Trainingszonen für die Trainingsintervention auf dem Wasser mittels Leistungsdiagnostik auf dem Kanu-Ergometer ermittelt. Die Ergebnisse aus *Studie 1* zeigen jedoch, dass die Eignung einer Ergometer-basierten Leistungsdiagnostik für die Bestimmung von Trainingsintensitäten auf dem Wasser zu hinterfragen ist.

Folglich war der Forschungsschwerpunkt der *Studie 2* eine retroprospektive Untersuchung der TID über eine gesamte Saison im Kanurennsport, anhand von Trainingszonen, die mittels spezifischer Leistungsdiagnostik auf dem Wasser ermittelt wurden.

2.2.2. Untersuchungsdesign

Im Zeitraum von Dezember 2019 bis August 2020 wurden die allgemeine Vorbereitungsperiode (AVP, 9-11 Wochen), die spezifische Vorbereitungsperiode

(SVP, 17 Wochen) sowie die Wettkampfperiode (WP, 7-8 Wochen) von Kanurennsportler:innen retrospektiv analysiert. Vor und nach jeder Periode wurde eine Leistungsdiagnostik durchgeführt, um die Leistungsentwicklung festzustellen und die Trainingszonen zu bestimmen (Abbildung 6). Die SVP überlagerte den COVID-19 bedingten Lockdown in Deutschland, sodass diese Periode einen längeren Zeitraum abdeckte als gewöhnlich im Kanurennsport. Einundzwanzig Kanurennsportler:innen konnten zunächst für die Studie rekrutiert werden. Vier männliche und sieben weibliche Kajakfahrer:innen sowie ein männlicher Canadierfahrer lieferten vollständige Daten für mindestens eine der drei untersuchten Trainingsperioden (Alter: $16,9 \pm 2,1$; Größe: $176 \pm 7,8$ cm; Gewicht: $71,3 \pm 7,1$ kg; VO_{2peak} : 3.236 ± 666 ml/min). Die übrigen neun Athlet:innen konnten aufgrund von Krankheit, Verletzung, COVID-19 bedingter Quarantäne, etc. lediglich lückenhafte Daten liefern und mussten somit ausgeschlossen werden.



Legende: HF = Herzfrequenz; GPS = Global positioning system, T = Testzeitpunkt

Abbildung 6. Studiendesign Studie 2 (Übersetzt aus Matzka, Leppich, Holmberg, et al., 2022)

Die HF, die Trainingsdistanz sowie die Trainingsdauer jeder/s Athlet:in wurde während jeder einzelnen Trainingseinheit auf dem Wasser mittels Smartwatch aufgenommen (M430, Polar Electro OY, Kempele, Finnland) und online gespeichert (Polar Flow, Polar Electro OY, Kempele, Finnland). Alle Trainingsdaten wurden visuell auf Fehler bzw. Vollständigkeit (fehlerhafte HF/GPS Daten; nicht plausible Trainingsdistanzen/-dauern, etc.) überprüft und wenn nötig aus der Analyse

ausgeschlossen. Der Trainingsumfang wurde anschließend mit dem online Trainingsprotokoll des Athleten abgeglichen. Mindestens 70% des protokollierten Trainingsumfangs einer/s Athlet:in mussten durch die Uhrendaten aufgenommen worden sein, um die/den Athlet:in in die Analyse mit aufzunehmen. Im Anschluss an diese Datenüberprüfung wurden die Gesamttrainingszeit je Intensitätszone für jede Trainingseinheit berechnet.

Die Trainingszonen wurden entsprechend eines Drei-Zonen-Modells (Seiler, 2010) als die HF, die einer Belastungsintensität von 60–80% (= Z1), 81–87% (= Z2) und $\geq 87\%$ (= Z3) der VO_{2peak} entspricht, definiert. Zusätzlich wurde der Polarisations-Index (Treff et al., 2017, 2019) für jede/n Athlet:in berechnet, um die individuelle Periodisierung des Trainings zu quantifizieren:

$$\text{Polarisations-Index (dimensionslos)} = \log (Z1 \cdot Z2^{-1} \cdot Z3).$$

Ein Polarisations-Index $>2,0$ deutet hierbei auf eine polarisierte Verteilung der Trainingsintensität hin (Treff et al., 2019).

Der Stufentest vor bzw. nach jeder Trainingsperiode entsprach dem Stufentest, der in *Studie 1* auf dem Wasser durchgeführt wurde. Er wurde lediglich um eine Stufe gekürzt, d.h. auf die erste Stufe bei ca. 60% der HF_{max} wurde verzichtet, da sich deren Mehrwert aus den Daten in *Studie 1* für die Berechnung der Trainingszonen als verzichtbar herausgestellt hat. Außerdem wurde aus Gründen der Praktikabilität keine Muskeloxygenierung gemessen.

Als Leistungsparameter wurden die VO_{2peak} , die Geschwindigkeit bei 2 und 4 $mmol \cdot L^{-1}$ BLa ($v_{2[Bla]}$, bzw. $v_{4[Bla]}$) sowie die Belastungszeit in der letzten 1500 m Stufe des Stufentests (1500-m-Zeitfahrt) herangezogen.

Ein lineares gemischtes Modell wurde angewendet, um die Wechselwirkungen zwischen den Trainingsperioden und Veränderungen in den abhängigen Variablen VO_{2peak} , $v_{2[Bla]}$, $v_{4[Bla]}$ und 1500-m-Zeitfahrt zu analysieren. Für den Vergleich der Trainingszeit je Trainingszone in den einzelnen Perioden wurden die Periode als fester Faktor und die Athlet:innen als Zufallsfaktor festgelegt. Für die Analyse der Effekte der Trainingsperiode auf die verschiedenen Leistungsparameter dienten die vier Testzeitpunkte als fester Faktor und die Athlet:innen als Zufallsfaktor. Bei

signifikanten Effekten der festen Faktoren wurden paarweise Vergleiche jeder Trainingsperiode bzw. jedes Testzeitpunktes durchgeführt. Der Bonferroni post-hoc Test wurde angewandt um den „*family-wise error*“ (Typ-I-Fehler) zu korrigieren. Potentielle Korrelationen zwischen den Veränderungen in den Leistungsparametern und verschiedenen Trainingskennziffern wurden mittels Korrelationen für Messwiederholung (Bakdash & Marusich, 2017) analysiert. Statistische Signifikanz wurde bei einem Alpha-Wert von $p \leq 0,05$ festgelegt. Die Effektstärke wurde anhand von Cohen's d berechnet (Cohen, 1988).

2.2.3. Zusammenfassende Ergebnisdarstellung

Die retrospektive Analyse des Wassertrainings beinhaltete 2.132 Trainingseinheiten in einer Zeitspanne von 34-37 Wochen, die ca. 17.900 Trainingskilometer bzw. ca. 2.000 Trainingsstunden abdeckte. Die mittlere wöchentliche Trainingszeit auf dem Wasser bezifferte sich auf $5,6 \pm 0,8$ Std. in der AVP, $6,1 \pm 0,9$ Std. in der SVP und $6,5 \pm 1,0$ Std. in der WP.

Im Verlauf der gesamten Saison verteilte sich die Trainingsintensität auf ca. 85 ± 11 , 10 ± 7 und $5 \pm 5\%$ in Z1, Z2 und Z3 mit einem Polarisations-Index von $1,6 \pm 0,3$. In den einzelnen Perioden stellte sich die Intensitätsverteilung auf Z1, Z2 und Z3 wie folgt dar:

- AVP: 84 ± 11 , 12 ± 8 , $4 \pm 4\%$ (Polarisations-Index: $1,4 \pm 0,4$)
- SVP: 80 ± 12 , 12 ± 7 , $8 \pm 6\%$ (Polarisations-Index: $1,4 \pm 0,2$)
- WP: 91 ± 5 , 5 ± 4 , $4 \pm 2\%$ (Polarisations-Index: $1,8 \pm 0,2$)

Die statistische Analyse ergab Unterschiede bei der Trainingszeit in Z1 zwischen der AVP und WP ($p < 0,01$; $d = -1,91$) sowie zwischen SVP und WP ($p = 0,03$; $d = -1,30$).

Die individuelle Bandbreite der Verteilung der Trainingsintensitäten in Z1, Z2 und Z3 stellte sich für die einzelnen Trainingsperioden wie folgt dar:

- AVP: 61–94, 3–26, 0–13% (Polarisations-Index: 0,9 – 1,9)
- SVP: 64–95, 4–26, 1–19% (Polarisations-Index: 1,4 – 2,0)
- WP: 81–96, 2–13, 1–6% (Polarisations-Index: 1,6 – 2,0)

In der AVP wiesen alle elf Athlet:innen eine pyramidale Verteilung der Trainingsintensität auf. In der SVP und WP hatten fast alle Athlet:innen eine pyramidale Intensitätsverteilung mit Ausnahme von zwei Athlet:innen in der SVP und einem Athleten in der WP. Sie wiesen eine polarisierte Verteilung des Trainings auf. Abbildung 7 zeigt zudem beispielhaft die große intraindividuelle Variation der Trainingsumfänge und -intensitätsverteilung.

Die statistische Analyse der Veränderung in den verschiedenen Leistungsparametern zwischen den Perioden ergab Unterschiede in den Veränderungen der $v_{2[Bla]}$ zwischen AVP ($3,62 \pm 3,43\%$) und SVP ($-0,84 \pm 2,16\%$) [$p = 0,04$; $d = 1,48$] sowie bei den Veränderungen der VO_{2peak} zwischen der AVP ($-3,11 \pm 5,94\%$) und SVP ($25,48 \pm 11,38\%$) [$p < 0,01$; $d = -3,06$] als auch zwischen SVP und CP ($0,34 \pm 12,06\%$) [$p = 0,04$; $d = 1,90$]. Keine Unterschiede konnten zwischen den anderen Perioden festgestellt werden. Ebenso konnten keine Effekte der Perioden auf die weiteren Leistungsparameter festgestellt werden.

Die Korrelationsanalyse ergab starke Korrelationen zwischen der wöchentlichen Trainingszeit in Z1 ($r = 0,66$; $p = 0,01$), sowie in Z2 ($r = -0,57$; $p = 0,04$) und der kumulierten wöchentlichen Trainingszeit in Z1-3 ($r = 0,66$; $p = 0,01$) und Veränderungen in der 1500-m-Zeitfahrt. Kein anderer Leistungsparameter zeigte Korrelationen mit einer der Trainingsvariablen.

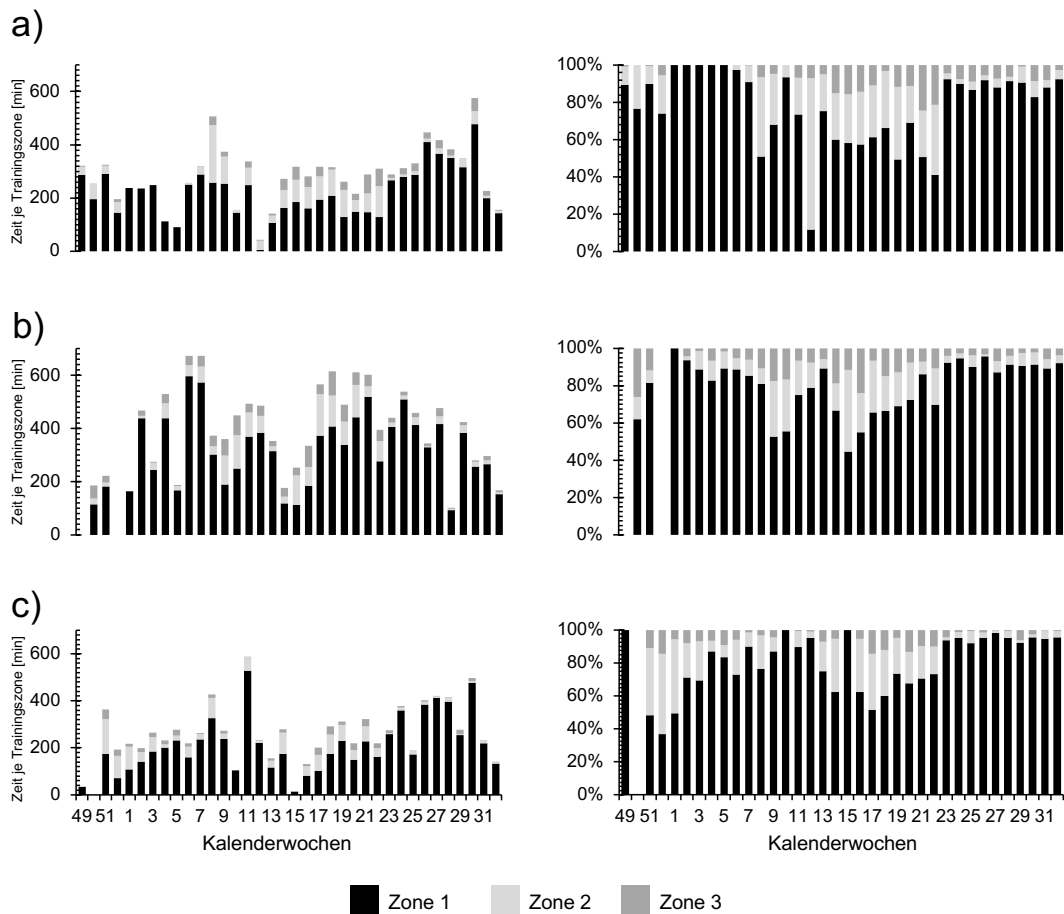


Abbildung 7. Intraindividuelle absolute und relative Intensitätsverteilung von drei (a, b, c) Athlet:innen (übersetzt aus Matzka, Leppich, Holmberg, et al., 2022).

2.2.4. Kurzfazit

Zusammenfassend stellte *Studie 2* starke inter- und intraindividuelle Variationen der TID von Kanurennsportler:innen dar.

Eine im Mittel pyramidale Struktur der TID über alle drei untersuchten Perioden bewirkte Verbesserungen in allen gemessenen Leistungsparametern.

Es scheint, dass die besonderen Umstände (vermehrte Regenerationsmöglichkeiten) während des COVID-19 bedingten Lockdowns in Deutschland es den untersuchten Athlet:innen ermöglichte eine Doppelung der Z3 Anteile, bei gleichbleibenden Z1 und Z2 Anteilen und gleichzeitiger Steigerung des Gesamttrainingsumfangs zu verwirklichen. Diese Veränderungen haben möglicherweise die Leistungssteigerung in dieser Phase positiv beeinflusst.

Weitere Steigerungen des spezifischen Trainingsumfangs im Anschluss an den Lockdown in der WP scheinen durch Reduktion der Anteile von Z2 und Z3 und somit größere Umfänge in Z1 realisiert worden zu sein.

2.2.5. Ausblick

Ein Blick auf die eingesetzte Methode der TID-Quantifizierung warf in *Studie 2* die Frage auf, ob der in der SVP und WP aufgezeigte Trend in Richtung einer polarisierten TID ggf. bei Einsatz einer anderen Quantifizierungsmethode eine wahre polarisierte Verteilung gezeigt hätte. Diese Vermutung gründet auf der Trägheit der Herzfrequenzreaktion zum Beginn von hochintensiven Belastungen, die vor allem eine Unterschätzung der Zeit in Z3 und eine Überschätzung der Zeit in Z2 bedingen kann (Hogan et al., 2019, 2020). Da insbesondere in der WP im Kanurennsport kurze, hochintensive Belastungen in Anlehnung an die Wettkampfbelastungen durchgeführt werden, scheint die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die in *Studie 2* eingesetzte Quantifizierungsmethode der TID die tatsächliche Intensitätsverteilung nicht adäquat widerspiegelt.

Dies lässt sich im Weiteren noch dadurch stützen, dass auch der kardiovaskuläre Drift bei länger andauernden niedrigintensiven bis moderaten Belastungsintensitäten im Kanurennsport dazu führt, dass die Zeit unterhalb der Z2 unterschätzt und die in Z2 und Z3 überschätzt wird (Hogan et al., 2019). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass vor allem in der AVP von *Studie 2*, in der vorrangig langandauernde niedrigintensive bis moderate Belastungen im Kanurennsport absolviert werden, die Anteile der Z1 unterschätzt und die der Z3 überschätzt wurden.

Diese Limitation der Aussagekraft der Ergebnisse aus *Studie 2* warf die weitere Forschungsfrage auf, inwiefern ein anderer, nicht-physiologischer Messparameter zur TID Quantifizierung die Ergebnisse einer Analyse der TID im Kanurennsport beeinflusst.

2.3. Studie 3: Retrospective analysis of training intensity distribution based on race pace vs. physiological benchmarks in highly trained sprint kayakers

Matzka et al. *Sports Medicine - Open* (2022) 8:1
<https://doi.org/10.1186/s40798-021-00382-y>

Sports Medicine - Open

ORIGINAL RESEARCH ARTICLE

Open Access

Retrospective Analysis of Training Intensity Distribution Based on Race Pace Versus Physiological Benchmarks in Highly Trained Sprint Kayakers



Manuel Matzka¹, Robert Leppich², Billy Sperlich^{1*}  and Christoph Zinner³

2.3.1. Problemdarstellung

Die gegenwärtige wissenschaftliche Debatte um die beste Variante der TID im Ausdauersport favorisiert zwei Modelle, die bei den meisten Hochleistungssportathlet:innen Anwendung finden: (1) Die pyramidale und (2) die polarisierte Intensitätsverteilung (Stöggl & Sperlich, 2015). Bisher war die Wissenschaft nicht in der Lage darzustellen, welche bzw. ob eine der beiden Varianten im Ausdauersport im Allgemeinen und im Kanu im Speziellen überlegen ist. Ein möglicher Grund für diese Unklarheit scheinen die unterschiedlichen Methoden zur Quantifizierung der Trainingsintensität zu sein (Bellinger et al., 2020). Ein Vergleich von HF-basierter mit geschwindigkeitsbasierter TID-Quantifizierung in Mittel- und Langstreckenläufern während einer achtwöchigen AVP fand beispielsweise eine polarisierte (Z1: 79,9% ± 7,3%; Z2: 5,3% ± 4,9%; Z3: 14,7% ± 7,3%; Polarisations-Index: 2,3) Intensitätsstruktur für die geschwindigkeitsbasierte Variante und eine pyramidale (Z1: 79,6% ± 7,2%; Z2: 17,0% ± 6,3%; Z3: 3,4% ± 2,0%; Polarisations-Index: 1,2) bei HF-basierter Quantifizierung (Kenneally et al., 2020). Diese Ergebnisse decken sich mit den Vermutungen in *Studie 2*.

Kenneally et al. (2018, 2020) haben zudem kürzlich eine weitere Methode für die Bestimmung von Ausdauerintensitätszonen kreiert. Sie teilt die Intensitätszonen auf Grundlage der individuellen Wettkampfleistung als relative Intensität zum Wettkampftempo ein. Die Forscher begründen diese neue Methode darin, dass die Wettkampfleistung von verschiedensten internen (Zentrales Nervensystem, Biomechanik, Herz-Kreislaufsystem) sowie externen (Umweltbedingungen, Taktik, etc.) Faktoren beeinflusst wird, die bisherigen Analysemethoden der Trainingsintensität jedoch ausschließlich auf physiologischen Grundlagen basieren. Nichtsdestotrotz darf nicht außer acht gelassen werden, dass die Entwicklung bestimmter physiologischer Fähigkeiten eng mit der Ausdauerleistungsfähigkeit zusammenhängen, und dass es allgemein anerkannt ist, dass die Zeit in bestimmten physiologisch determinierten Trainingszonen spezifische Anpassungen genau dieser Fähigkeiten induziert (Stöggli & Sperlich, 2014). In Trainingsphasen, in denen allerdings die Ausbildung der spezifischen Wettkampfleistung eine übergeordnete Rolle spielt, könnte eine Trainingsplanung und -analyse der Trainingszonen anhand des Wettkampftempo eine bessere Methode darstellen.

Bis dato gibt es keine Studien mit Kanurennsportler:innen, die eine Analyse der Trainingsintensitäten über eine gesamte Trainingsperiode anhand interner (physiologischer) Parameter mit einer Analyse basierend auf externen Parametern (z.B. Tempo) verglichen haben. Ebenso gibt es keine Untersuchungen, die eine Analyse der TID anhand einer Zoneneinteilung in Relation zum Wettkampftempo durchgeführt haben.

Somit war das Ziel der *Studie 3* ein retropektiver Vergleich verschiedener Quantifizierungsmethoden der TID basierend auf physiologisch determinierten Trainingszonen mittels HF- (TID_{BLa-HF}) und Geschwindigkeitsmonitoring (TID_{BLa-V}) sowie Trainingszonen in Relation zum Wettkampftempo mittels Geschwindigkeitsmonitoring (TID_{WK-V}) während einer achtwöchigen WP in hochtrainierten Kanurennsportler:innen.

2.3.2. Untersuchungsdesign

Die Untersuchung fand im Rahmen der Saisonanalyse der *Studie 2* statt. Der Untersuchungszeitraum stellte die finalen acht Trainingswochen der Kanurennsportler:innen vor der Deutschen Meisterschaft im August 2020 dar. Neun Athlet:innen (Alter: $17,3 \pm 2,3$; Größe: 177 ± 9 ; Gewicht: $73,8 \pm 7,7$; VO_{2peak} : 3.894 ± 1.110 ml/min) nahmen an der Untersuchung teil, wovon vier im Nachwuchskader des DKV waren und die anderen fünf im D-Kader des Kanu-Verband Nordrhein-Westfalen.

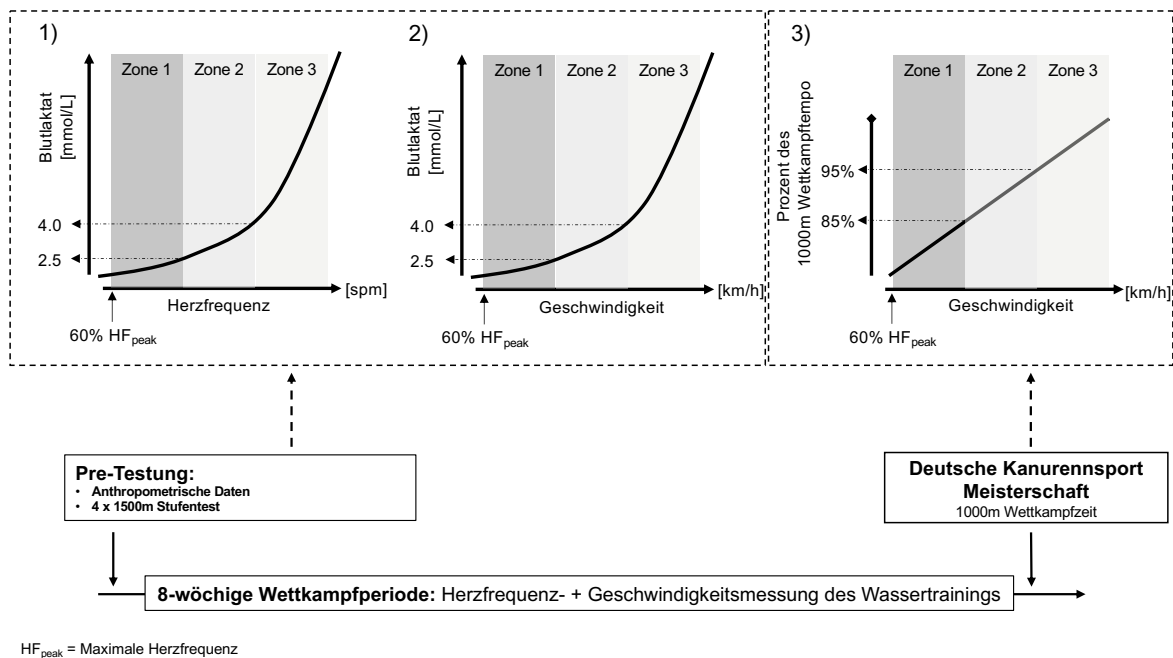


Abbildung 8. Studiendesign Studie 3 (übersetzt aus Matzka, Leppich, Sperlich, et al., 2022)

Die Zoneneinteilung für TID_{BLa-HF} und TID_{BLa-V} basierte auf der HF bzw. dem Tempo in Relation zu festen BLa-Werten, die mittels Stufentest (vgl. *Studie 2*) vor dem Untersuchungszeitraum ermittelt wurden. Z1 wurde durch die HF bzw. das Tempo entsprechend $>60\%$ der maximalen HF bis zu einem BLa-Wert von $2,5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ definiert, Z2 war die HF bzw. das Tempo entsprechend einem BLa-Wert zwischen $2,5$ und $4,0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ und Z3 wurde durch die die HF bzw. das Tempo, das einem BLa-Wert $>4,0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ entsprach, definiert. Diese Referenzwerte der Zoneneinteilung entsprechen der Kategorisierung nach Seiler (2010).

Die Zoneneinteilung für TID_{WK-V} basierte auf dem Drei-Zonen-Modell der Arbeitsgruppe um Kenneally et al. (2018, 2020) und entsprach ebenso den tempobezogenen Trainingsbereichen der Rahmentrainingskonzeption des DKV (Kahl, 2005). Grundlage stellte die Bestleistung über die 1000 m Distanz bei der Deutschen Meisterschaft im Anschluss an den Untersuchungszeitraum dar. Z1 entsprach dem Tempo bei $>60\%$ der maximalen HF bis zu 85% des Wettkampftempos, Z2 wurde zwischen 86% und 95% des Wettkampftempos definiert und Z3 entsprach einem Tempo $>95\%$ des Wettkampftempos.

Aus der Zeit je Trainingszone wurde der Polarisations-Index zur Quantifizierung des individuellen Levels der Polarisation berechnet (vgl. *Studie 2*).

Da in *Studie 3* die Daten im Rahmen der langfristig angelegten *Studie 2* genutzt wurden, war der Stufentest zur Ermittlung der Intensitätszonen identisch mit dem in *Studie 2*. Gleiches gilt für das Monitoring des Trainings, einzig mit dem Zusatz, dass in der aktuellen *Studie 3* zusätzlich zu der HF auch die Geschwindigkeitsdaten der Uhren der Athleten über das Online-Portal der Uhrendaten (Polar Flow, Polar Electro OY, Kempele, Finnland) visuell geprüft und anschließend analysiert wurden.

Eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Bonferroni post-hoc Test wurde angewendet, um die Unterschiede in der TID zwischen den drei untersuchten Quantifizierungsmethoden statistisch zu analysieren. Statistische Signifikanz wurde bei einem Alpha-Wert von $p \leq 0,05$ festgelegt. Die Effektstärke wurde anhand von Cohen's d berechnet (Cohen, 1988).

2.3.3. Zusammenfassende Ergebnisdarstellung

Die Analyse zeigte für TID_{BLa-HF} eine pyramidale Struktur der Intensitätsverteilung (Z1: $91 \pm 4\%$, Z2: $6 \pm 2\%$, Z3: $3 \pm 2\%$; Polarisations-Index: $1,6 \pm 0,4$), während TID_{BLa-V} eine polarisierte Struktur (Z1: $68 \pm 14\%$, Z2: $14 \pm 8\%$, Z3: $18 \pm 8\%$; Polarisations-Index: $1,9 \pm 0,3$) aufwies, auch wenn diese entsprechend dem Kriterium des Polarisations-Index nicht als rein polarisiert angesehen werden kann. Alle drei Zonen unterschieden sich zudem signifikant voneinander (Z1: $p < 0,01$; $d = -2,23$ / Z2: $p = 0,01$; $d = 1,37$ / Z3: $p < 0,01$; $d = 2,57$).

Auch die TID_{WK-V} zeigte eine pyramidale Struktur mit $73 \pm 5\%$ in Z1, $20 \pm 5\%$ in Z2 und $7 \pm 2\%$ in Z3 (Polarisations-Index: $1,4 \pm 0,2$) auf. Z1 ($p < 0,01$; $d = 4,20$) und Z2 ($p < 0,01$; $d = -3,68$), nicht jedoch Z3 der TID_{WK-V} unterschieden sich von denen der TID_{BLa-HF} . Im Vergleich zwischen TID_{BLa-V} und TID_{WK-V} wurde nur ein Unterschied mit Z3 gefunden ($p < 0,01$; $d = 1,89$).

Eine individuelle Betrachtung zeigte für alle bis auf einen der neun Athlet:innen eine pyramidale Verteilung der Trainingsintensität für TID_{BLa-HF} , wobei sich für den übrigen Athleten mit einem Polarisations-Index von 2,1 eine polarisierte Verteilung darstellte. Bei individueller Betrachtung der TID_{BLa-V} wiesen drei Athlet:innen eine eindeutig polarisierte TID (Polarisations-Index $\geq 2,1$) auf, zwei weitere eine tendenziell polarisierte TID ($Z3 > Z2$), und die übrigen Athlet:innen eine pyramidale TID. Bei TID_{WK-V} zeigten alle Athlet:innen eine pyramidale TID.

2.3.4. Kurzfazit

Zusammenfassend zeigt *Studie 3*, dass die eingesetzt Quantifizierungsmethode der Trainingsintensität einen deutlichen Einfluss auf die Berechnung der TID im Kanurennsport hat. Der auffälligste Unterschied in der aktuellen Studie war die geringe interindividuelle Variation der TID für TID_{WK-V} . In Abhängigkeit von der Intention des Trainings oder der Trainingsanalyse haben alle drei untersuchten Methoden der TID Quantifizierung ihre Vor- und Nachteile. Eine sportpraktische Konsequenz könnte sein, die Methoden in Symbiose einzusetzen, um den Saisonabschnitten mit unterschiedlichen Belastungsstrukturen und Trainingszielen gerecht zu werden bzw. um zusätzliche Informationen für die Bewertung des Trainings und daraus folgende Entscheidungen zu haben.

3. Diskussion

Ziel der vorliegenden kumulativen Dissertationsarbeit war es, erste wissenschaftliche Erkenntnisse bezüglich der TID und deren Quantifizierungsmethodik in der durch die Oberkörpermuskulatur angetriebenen Sportart Kanurennsport zu gewinnen und diese mit dem Wissensstand aus Sportarten, die obere und untere Extremitäten (z.B. Biathlon, Rudern) bzw. vorrangig die unteren Extremitäten (z.B. Radsport, Laufen) für den Vortrieb einsetzen, abzugleichen. Vorbereitend auf die Untersuchungen in *Studie 2* und *Studie 3* diente *Studie 1* der Erkenntnisgewinnung für die Wahl der Diagnostikmethode.

3.1. Feldbasierte Leistungsdiagnostik auf dem Wasser vs. laborbasierte Diagnostik auf dem Kanu-Ergometer

3.1.1. Zusammenhänge zwischen Leistungsdiagnostik und Wettkampfleistung

Von allen untersuchten leistungsbezogenen Parametern aus den Stufentests auf dem Wasser und auf dem Ergometer wurden für alle drei olympischen Wettkampfstrecken die stärksten Zusammenhänge mit der durchschnittlichen Leistung in der letzten Stufe des Stufentests gefunden. Dieses Ergebnis deckt sich mit anderen Untersuchungen im Kanurennsport, die starke Korrelationen diverser Parameter der Leistung (maximale aerobe Leistung, Leistung an der Laktatschwelle, Arbeit vollrichtet während eines 30-sekündigen Wingate Anaerobic Test, Arbeit vollrichtet während einer 2-minütigen Ausbelastung) mit Wettkampfleistungen fanden (Terblanche et al., 2005; van Someren & Howatson, 2008; van Someren & Palmer, 2003).

Da Kanurennsport hohe Anforderungen an Ausdauer- (Zamparo et al., 1999; Zouhal et al., 2012) wie auch Krafftfähigkeiten (dos Santos & da Silva, 2010; McKean & Burkett, 2014; Ualí et al., 2012; van Someren & Howatson, 2008; van Someren & Palmer, 2003) stellt, ist es nicht überraschend, dass eine hohe durchschnittliche

Leistungsabgabe über eine bestimmte Zeit oder Distanz eng mit der spezifischen Leistung korreliert. So konnte u.a. auch gezeigt werden, dass eine 1%-ige Steigerung der Leistungsabgabe die Bootsgeschwindigkeit im Kajak um ca. 0,33% erhöht (Jackson, 1995). Jedoch muss man beim Kajakfahren auf dem Ergometer beachten, dass die physikalische Leistung indirekt über die Winkelgeschwindigkeit des Schwungrades, das über Zugseile an den Paddelschaft befestigt ist, berechnet wird. Insofern ermöglicht die über das Ergometer berechnete Leistung keine Aussage über die Qualität dieser, da unklar ist, ob die von der/dem Athlet:in eingesetzte Technik ökonomisch und maximal vortriebsgerichtet ist. Auf dem Wasser ist ein optimierter Einsatz des Wing-Paddels für einen effizienten Bootsvortrieb essenziell (R. Sanders & Baker, 1998). So führt beispielsweise ein zu langer Zug des Paddels nach hinten zu einem suboptimalen Kraftvektor zum Ende des Paddelzugs (vgl. Abbildung 9 - „Aushubphase“), der das Boot tiefer ins Wasser zieht und somit für eine größere Reibungsfläche des Kajaks im Wasser sorgt (Michael et al., 2009). Während dieser „zu lange“ Paddelzug im Kajak auf dem Wasser durch den erhöhten Reibungswiderstand „bestraft“ wird, führt ein längerer Zug auf dem Paddelergometer lediglich zu einer größeren gemessenen Leistungsabgabe.

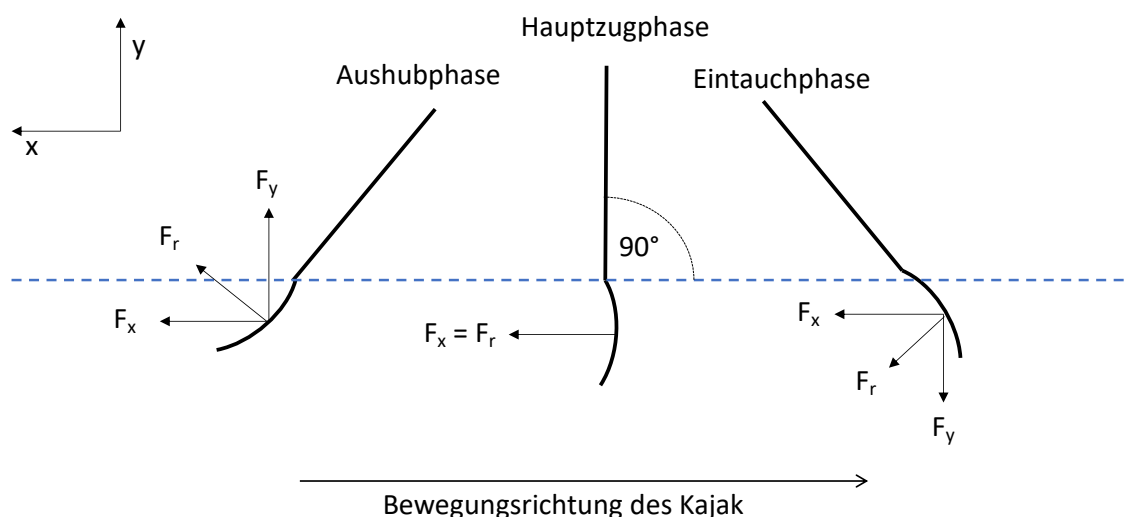


Abbildung 9. Kinetik des Paddelzugs während der vortriebsgenerierenden Wasserphase (Zugphase). F_x = Kraft in x-Richtung, F_y = Kraft in y-Richtung, F_r = resultierende Kraft (übersetzt und modifiziert von Michael et al., 2009)

Daher ist anzunehmen, dass die Fahrtzeit der letzten Stufe des Stufentests auf dem Wasser in *Studie 1* noch stärker mit der Wettkampfleistung korreliert hätte, was allerdings nicht untersucht wurde. Dementsprechend sollte die hohe Korrelation der durchschnittlichen Leistungsabgabe auf dem Ergometer mit der Wettkampfleistung mit Vorsicht interpretiert werden. Bei der Evaluierung der spezifischen Leistungsfähigkeit im Kajak auf dem Wasser mittels Diagnostik auf dem Kajak-Ergometer sollte stets das individuelle technische Niveau der/des untersuchten Athlet:in berücksichtigt werden.

3.1.2. Unterschiede zwischen der Leistungsdiagnostik auf dem Wasser und auf dem Ergometer

Die gefundenen Differenzen in der VO_{2peak} sind möglicherweise ein Ergebnis der unterschiedlichen Muskelaktivierung während des Kajakfahrens auf dem Wasser verglichen mit dem Kajak-Ergometer. Auch wenn die Muskelaktivität in der aktuellen Studie nicht gemessen wurde, gibt es Untersuchungen, die eine erhöhte Aktivität der Bein- und Beckenmuskulatur zur Stabilisierung im Boot während intensiven Belastungen darlegen (Bjerkefors et al., 2018). Größere Standardabweichungen in Bewegungsmustern von Armen und Schultern beim Kajak fahren auf dem Wasser im Vergleich mit dem Ergometer weisen zudem auf eine größere Instabilität im Boot auf dem Wasser hin (Klitgaard et al., 2021).

Die höheren RPE-Werte bei der Ergometerbelastung in den submaximalen Belastungsstufen der *Studie 1* decken sich mit früheren Ergebnissen. Eine mögliche Erklärung stellt die höhere Muskelaktivierung des *M. deltoideus anterior* durch Zugkräfte beim Rücklauf des Zugseils am Schwungrad am Paddelergometer bei der Umsetzphase des Paddelschlags dar (Winchcombe et al., 2019). Das Feedback der Athlet:innen und die eigene Erfahrung weisen jedoch eher darauf hin, dass das Ergometer die Gleitphase zwischen den Zugphasen auf dem Wasser schlecht simuliert und daher die Kraftspitze (engl. *peak force*) während des Zuges bei submaximalen Schlagfrequenzen deutlich eher erreicht wird (Fleming, Donne, Fletcher, et al., 2012). Daher fühlt sich der Paddelschlag nur bei niedrigen Intensitäten „härter“ an. Bei höheren Intensitäten mit maximalen Schlagfrequenzen spielt die Gleitphase eine zu vernachlässigende Rolle. Bei sehr niedrigen

Intensitäten hingegen (z.B. die erste Stufe des Stufentests) ist die aufgebrachte Kraft so gering, dass keine Unterschiede durch die Athlet:innen wahrgenommen wurden.

Die Muskeloxygenierung während der Ausbelastungsstufe im Stufentest war ca. 21% geringer auf dem Ergometer im Vergleich zur Belastung auf dem Wasser. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Muskeloxygenierung mit der Muskelaktivität korreliert und somit als Indikator für muskuläre Ermüdung dienen kann (Perrey & Ferrari, 2018). Die aktuellen Ergebnisse bestätigen Aussagen, dass Kajak fahren auf dem Wasser eine höhere Aktivität des *M. triceps brachii* und *M. latissimus dorsi* verglichen mit Ergometerbelastungen aufzeigt und dass auf dem Ergometer mit steigender Belastung eine vergleichsweise größere Ellbogenflexion auftritt (Bjerkefors et al., 2018; Klitgaard et al., 2021). Ein Grund für letzteres Phänomen könnten die Rückschlag Kräfte des Zugseils am Paddelschaft auf dem Ergometer sein, die die/den Kanut:in zu einer größeren Muskelarbeit des *M. biceps brachii* zwingen (Fleming, Donne, Fletcher, et al., 2012). Desweiteren könnte der Unterschied ein Resultat dessen sein, dass, wie oben genannt, das Ergometer bei der Berechnung der Wattleistung einen engen und weiten Zug nach hinten belohnt. Konzentriert sich ein/e Athlet:in also primär auf diese berechnete Leistung des Monitors am Ergometer, so lässt er/sie ggf. die auf dem Wasser effizientere Technik stärker außer acht. Insofern deuten die Befunde darauf hin, dass regelmäßiges Training auf dem Kanu-Ergometer potenziell die Muster der Muskelaktivität sowie auch die Bewegungstechnik negativ beeinflusst. Der Einsatz von Ergometern bei Diagnostik und Training sollte daher mit Vorsicht stattfinden und der Mehrwert ist vor allem bei jüngeren unerfahrenen Sportler:innen mit instabiler Technik zu hinterfragen.

Die Ergebnisse aus *Studie 1* lassen schlussfolgern, dass sowohl ein Stufentest auf dem Wasser als auch auf dem Ergometer in diversen leistungsbezogenen Parametern vergleichbar stark mit der Wettkampfleistung über alle drei olympischen Distanzen korrelieren. Beim Vergleich der absolut gemessenen Werte stellen sich jedoch sowohl bei der VO_2 als auch bei der Muskeloxygenierung des *M. biceps brachii* Unterschiede bei hohen bis maximalen Belastungsintensitäten dar. Diese weisen darauf hin, dass die Belastung auf dem Ergometer die im Kajak auf dem Wasser nicht akkurat imitiert. Somit ist eine Ergometer-basierte Diagnostik zur

Leistungsanalyse und Trainingsplanung mit Vorsicht einzusetzen. Insbesondere für das spezifische Training auf dem Wasser scheint die Bestimmung von Trainingszonen anhand physiologischer Parameter (z.B. VO_{2peak}) mittels Diagnostik auf dem Wasser der auf dem Ergometer vorzuziehen zu sein.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde in der folgenden Untersuchung zur Verteilung der Trainingsintensität im Kanurennsport auf eine Leistungsdiagnostik auf dem Wasser zurückgegriffen.

3.2. Analyse der Trainingsintensitätsverteilung und der Quantifizierungsmethoden im Kanurennsport

Die Ergebnisse der *Studien 2 und 3* haben in Bezug auf die TID im Ausdauersport mehrere sportpraktische Konsequenzen ergeben, die im Folgenden im Gesamtkontext des Ausdauersports wie auch spezifisch für den Kanurennsport diskutiert werden.

3.2.1. Die Trainingsintensitätsverteilung im Saisonverlauf

Studie 2 identifizierte im Mittel eine pyramidale TID mit sehr hohen Anteilen in Z1 der untersuchten Sportler:innen basierend auf der HF-Datennalyse über den gesamten Saisonverlauf und ist in Übereinstimmung mit einer Vielzahl früherer Studien im Rudern (Guellich et al., 2009; Nybo et al., 2014; Plews et al., 2014; Steinacker et al., 1998; Treff et al., 2017), Radsport (Lucía et al., 2000; Neal et al., 2011; Schumacher & Mueller, 2002; Zapico et al., 2007), Triathlon (Neal et al., 2013), Skilanglauf (Torvik et al., 2021) und Laufen (Esteve-Lanao et al., 2005). Eine Erklärung für diese TID ist, dass hohe Anteile niedriger Trainingsintensität notwendig sind, um potenziellen negativen Effekten (z.B. vegetativer und hormoneller Stress, entleerte Energiespeicher) des Trainings in Intensitätsbereichen an oder über der anaeroben Schwelle entgegenzuwirken (Bourgois et al., 2019). Ebenso ist bekannt, dass ein hohes Trainingsvolumen in niedrigen Intensitätsbereichen zur Ökonomisierung des Fett- und

Glukosestoffwechsels führt, was für Ausdauersportler (1) eine bessere aerobe Energiebereitstellung und (2) eine bessere Erholungsfähigkeit nach hochintensiven Intervalleinheiten bedeutet (Romijn et al., 1993). Letztere spielen im weiteren Saisonverlauf eine bedeutendere Rolle, wie im Folgenden diskutiert wird.

So zeigte *Studie 2* ebenso in Übereinstimmung mit Studien aus verschiedensten Sportarten wie Rudern (Guellich et al., 2009; Plews et al., 2014), Skilanglauf (Sandbakk et al., 2011; Solli et al., 2017; Tønnessen et al., 2014), Laufen (Robinson et al., 1991) und Radfahren (Lucía et al., 2000), dass die TID Richtung Saisonhöhepunkt vermehrt zu einer polarisierten Struktur mit sehr hohen Anteilen in Z1 und geringer werdenden Anteilen in Z2 und Z3 tendiert. In *Studie 3* konnte zudem für die WP der gleichen Kohorte wie in *Studie 2* dargestellt werden, dass bei einer TID Quantifizierung mittels Geschwindigkeit tatsächlich eine polarisierte TID vorlag.

Es zeigt sich somit sportartübergreifend, dass die TID zum Wettkampfhöhepunkt zunehmend polarisierter wird. So konnte auch eine aktuelle prospektive 16-wöchige Trainingsintervention mit gut trainierten Ausdauerläufer:innen die Überlegenheit einer TID-Entwicklung von pyramidal zu polarisiert zum Wettkampf hin gegenüber anderen Periodisierungsmustern aufzeigen (Filipas et al., 2021). Die Studie verglich eine polarisierte und eine pyramidale TID (jeweils 16 Wochen) sowie Mischformen dieser TIDs (polarisiert→pyramidal & pyramidal →polarisiert), die jeweils acht Wochen je TID-Muster beinhalteten, mit Blick auf diverse Ausdauerleistungsparameter. Sie fanden für alle Varianten Verbesserungen in den untersuchten Parametern, aber die größten Effekte auf alle Parameter für die TID „pyramidal →polarisiert“. Beim Vergleich einer pyramidalen und einer polarisierten TID mit Hochleistungsruderern in einer 11-wöchigen Wettkampfvorbereitung stellten eine Arbeitsgruppe um Treff (2017) zudem fest, dass die reale, auf wissenschaftlichen Empfehlungen basierende, Trainingspraxis in ihrer Studie dazu geführt hat, dass auch in der pyramidal trainierenden Trainingsgruppe die finale „Taper-Phase“ (zwei Wochen) polarisiert war. Im Anschluss der Intervention konnten keine Unterschiede zwischen den Interventionsgruppen festgestellt werden. Daraus schlussfolgerten sie, dass kurze Phasen polarisierten Trainings nach längeren Phasen mit pyramidaler TID-Struktur ausreichend zu sein scheinen, um die gewünschten Leistungsanpassungen zu erreichen (Treff et al., 2017). Diese Ergebnisse verwundern nicht, da die Trainingsintensität grundsätzlich als

wichtigster Faktor für die Maximierung der physiologischen und leistungsspezifischen Anpassungen von Athlet:innen angesehen wird (Bangsbo et al., 2010; Mujika, 2010; Tønnessen et al., 2014). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Ausmaß des Z3-Volumens Richtung Wettkampfhöhepunkt grundsätzlich auch von der physiologischen Belastungsanforderung der individuellen Wettkampfbelastung (z.B. 10km- vs. Marathonläufer) abhängen wird (Burnley et al., 2022).

Zwei 12- (García-Pallarés et al., 2009) bzw. 22-wöchige (García-Pallarés et al., 2010) prospektive Trainingsinterventionen mit spanischen männlichen Kanurennsportlern im Nationalkader implementierten hingegen intensivere TIDs als zuvor beschrieben, mit deutlich höheren Anteilen in Z2 und Z3 (55 – 75% kumuliert) und vergleichsweise geringen Anteilen in Z1 (25 – 45%) je nach Trainingsphase und Periodisierungsmodell (Blockperiodisierung, 12 Wochen; lineare Periodisierung, 22 Wochen). Die Studien fanden für beide Periodisierungsmodelle Verbesserungen in den leistungsbezogenen Messparametern mit vergleichbaren Steigerungen der VO_{2peak} (9,0 – 9,9%) und der VO_2 an der anaeroben Laktatschwelle (7,8 – 8,6%) und einer deutlicheren Steigerung der Paddelgeschwindigkeit an der VO_{2peak} für die Blockperiodisierung [5,8 vs. LP: 3,3%] (García-Pallarés et al., 2009, 2010).

Mögliche Gründe für den Einsatz einer deutlich intensiveren TID im Kanurennsport verglichen mit unterkörper-/ganzkörperlastigen Sportarten könnten in den unterschiedlichen Teillasten, die vom Körper getragen werden müssen, liegen (sitzend vs. stehend) sowie in der Art der biomechanischen Beanspruchung [z.B. Kraftentfaltung sowie Belastung an Muskeln und Gelenken, Bewegungsfrequenz, etc.] (Bourgois et al., 2019; Sandbakk et al., 2021). Auch Differenzen in den kardiorespiratorischen sowie vaskulären Anforderungen zwischen den Belastungsformen, sowie in der metabolischen Belastung und/oder der bei der Belastung rekrutierten Muskelfasertypen können weitere Begründungen für die Unterschiede in der Verteilung der Trainingsintensität darstellen (Bourgois et al., 2019; Sandbakk et al., 2021). Nicht zuletzt stellen die Belastungszeiten der olympischen Distanzen im Kanurennsport (200 m: ca. 35 bis 1000 m: ca. 240 s) deutlich kürzere und intensivere Belastungen dar, verglichen mit Sportarten wie Straßenradrennen, Langstreckenlauf und Skilanglauf.

Allerdings muss hinterfragt werden, inwiefern diese Einzelbefunde zur TID der Realität im langfristigen Trainingsprozess im Kanurennsport entsprechen. So konnte *Studie 2* diese Art der intensiv ausgerichteten Trainingsintensitätsverteilung nicht annähernd bestätigen. Aus der Methodik der Studien der Spanier geht hervor, dass die Untersuchungen dem Trainingsstart der jeweiligen Saison entsprachen und die Sportler aus einer fünf-wöchigen Übergangsperiode ohne jegliches Wasser- oder Krafttraining in die Studien gestartet sind (García-Pallarés et al., 2009, 2010). Inwiefern diese Methodik weitergehend im Saisonverlauf angewandt wurde oder ob andere Methoden eingesetzt wurden, ist nicht beschrieben. Dass ein kurzzeitiges (4-12 Wochen) hochintensives Training in der Lage ist, außergewöhnliche Trainingsanpassungen in Leistungssportlern hervorzurufen, wurde zuvor auch in anderen Sportarten gezeigt (Laursen, 2010). Jedoch kommt es auch nach kurzer Zeit zu einem Plateau der Leistungsentwicklung (Seiler & Tønnessen, 2009). Hohe Volumen hochintensivem Trainings können zu einer Herabregulation des sympathischen Nervensystems führen und letztendlich zu einer reduzierten Herzleistung und somit eine verminderten Blutfluss in Richtung der Arbeitsmuskulatur (Campos et al., 2021). Das hohe Gesamttrainingsvolumen, das professionelle Ausdauerleistungssportler:innen im Training absolvieren, bedingt aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen möglicher Trainingsdauer und Trainingsintensität ein umfangreiches Trainingsvolumen im niedrigintensiven (Z1) Belastungsbereich (Burnley et al., 2022). Der tatsächliche Umfang von Z1-Training und die zu erwartende Effektivität hängt hierbei, wie bereits erwähnt, u.a. von der Belastungsform der Sportart (exzentrisch-konzentrische vs. rein konzentrische Muskelarbeit; sitzend vs. stehend/laufend, etc.), der Wettkampfbelastung sowie der/dem Athlet:in (Leistungsstatus, Trainingsalter, Trainingseinheiten pro Woche, etc.) selber ab (Burnley et al., 2022). So fanden García-Pallarés et al. (2010) in der 22-wöchigen lineare Periodisierung auch bereits nach den ersten 12 Trainingswochen (= 1. Trainingsphase) ein Plateau bei fast allen untersuchten Leistungsparametern. Es ist insofern zu vermuten, dass hier die Akkumulation von Ermüdung bereits eine Rolle gespielt hat, und dass auch die Variante der Blockperiodisierung bei längerer Durchführung ähnliche Effekte dargestellt hätte.

Auch wenn einige biomechanische und physiologische Aspekte mögliche Gründe für eine unterschiedliche Herangehensweise in der TID-Gestaltung bei der vom

Oberkörper angetriebenen Sportart Kanurennsport darstellen, zeigt *Studie 2* ein sehr ähnliches Bild wie Sportarten, die Ober- bzw. Ober- und Unterkörper bei der Vortriebsgenerierung einsetzen. Ausgehend von diesen Ergebnissen scheinen die bis dato in der Literatur für andere Sportarten beschriebenen Gründe für diese Struktur der TID auch für den Kanurennsport aufgeführt werden zu können. Bedenkt man, dass ein eher geringer Impact auf das Skelettmuskelsystem bei der im Sitzen/Knien durchgeführten Sportart Kanurennsport ein vergleichsweise hohes Trainingsvolumen ermöglicht, das aber durch die vergleichsweise kleine Oberkörpermuskulatur abgedeckt wird, so scheint es aus Sicht der Gesamtbelastung logisch, durch große Trainingsvolumen im niedrigintensivem Belastungsbereich (Z1) das Volumen im mittel- (Z2) bis hochintensiven (Z3) Bereich „abzupuffern“ (Burnley et al., 2022). Insofern muss beim Vergleich der TID zwischen den Sportarten immer auch bedacht werden, dass diese zunächst nur die relative Verteilung berücksichtigt. Die teilweise starken Unterschiede im Gesamttrainingsvolumen zwischen den Sportarten (u.a. bedingt durch den Impact auf die belasteten Strukturen) haben sehr wahrscheinlich einen Einfluss auf die TID und deren Effekte (Burnley et al., 2022; González-Ravé et al., 2021).

3.2.2. Einfluss der Quantifizierungsmethode auf die Darstellung der Trainingsintensitätsverteilung

Mittel- und hochintensive Belastungszonen (Zone 2 und Zone 3)

Studie 3 fand Unterschiede in allen drei Trainingszonen zwischen TID_{BLa-HF} und TID_{BLa-V} und bestätigte damit die Vermutung aus *Studie 2*. Die Ergebnisse decken sich mit den wenigen vergleichbaren Studien im Laufen (Bellinger et al., 2020) und Radfahren (D. Sanders et al., 2017). Bellinger et al. (2020) fanden in einer acht-wöchigen Trainingsintervention mit Mittelstreckenläufern eine pyramidale TID bei HF-basierter Zonenbestimmung und eine polarisierte TID, wenn die Geschwindigkeit zur Zonenbestimmung herangezogen wurde. Hier waren insbesondere Unterschiede in Z2 (HF: $17,0 \pm 6,3\%$ vs. Geschw.: $5,3 \pm 4,9\%$) und Z3 (HF: $3,4 \pm 2,0\%$ vs. Geschw.: $14,7 \pm 7,3\%$) zwischen den TID-Quantifizierungsmethoden zu erkennen. Eine zehn-wöchige Trainingsintervention mit männlichen Straßenradsportlern zeigte ebenso deutlich höhere Anteile in Z3 bei

einer wattgesteuerten Zonenquantifizierung ($11,5 \pm 2,5\%$) als bei der Quantifizierung mittels HF [$4,4 \pm 2,0\%$] (D. Sanders et al., 2017).

Eine Begründung dieser Diskrepanzen in der TID zwischen den Methoden zur Quantifizierung ist die Trägheit der HF-Reaktion zu Beginn (hoch-) intensiver Belastungen. Insbesondere bei kurzen, hochintensiven Belastungen (< 30 s) reagiert das Herz-Kreislauf-System verspätet mit dem Anstieg der HF, sodass die Höhe der HF die Dauer solcher Belastungen nicht adäquat widerspiegelt. Ebenso führt die verzögerte HF-Anpassung nach Belastungsende vor allem bei Intervallbelastungen zu einer Überschätzung der Trainingszeit in Z2 (Sylta et al., 2014), weshalb Sylta et al. (2014) vorschlagen, die Pausenzeiten bei Intervallbelastungen bei der TID Quantifizierung mittels HF herauszurechnen. Somit stellt sich eine Analyse der TID ausschließlich anhand der HF als unbrauchbar für die Darstellung der neuromuskulären Anforderungen kurzer hochintensiver Belastungen dar. Bei solchen Belastungen scheint eine Intensitätsbestimmung auf Grundlage von externen Messparametern (Geschwindigkeit, Leistungsabgabe) deutlich akkurater zu sein (Buchheit & Laursen, 2013; Campos et al., 2021; Hogan et al., 2019, 2020; D. Sanders et al., 2017). Bei Betrachtung der Trainingsmethoden im Kanurennsport lässt sich feststellen, dass kurze hoch- bis maximal-intensive Belastungen häufig Anwendung finden, da erstens die Startphase einen wichtigen Einfluss auf die Wettkampfleistung hat (Ualí et al., 2012) und zweitens die Leistungsabgabe innerhalb von 30-sekündigen Ausbelastungen stark mit der Leistung über alle drei olympischen Wettkampfstrecken korreliert (van Someren & Howatson, 2008). Die deutlich höheren Z3 Anteile bei TID-Quantifizierung mittels Geschwindigkeitsmessung verglichen mit der HF in *Studie 3* sind ein Hinweis auf diese Belastungen. Aktuelle Untersuchungen mit australischen Kanurennsportler:innen, in denen die TID einzelner Trainingseinheiten, quantifiziert mittels Herzfrequenz und mittels Leistungsmessung am Paddel, verglichen wurde, belegen diese Aussage (Hogan et al., 2019, 2020). Es lässt sich schlussfolgern, dass in Abhängigkeit von der Trainingsphase, der Unterschied zwischen einer HF-gesteuerten und einer auf externen (Geschwindigkeit, Leistung) Parametern beruhenden TID Analyse variiert. In Phasen mit niedrigen Intensitäten und längeren Belastungszeiten/-strecken (z.B. AVP) würde sich die TID zwischen den Quantifizierungsmethoden geringfügiger unterscheiden als in Phasen mit vielen

hochintensiven kurzen Belastungen (z.B. WP) (Campos et al., 2021; D. Sanders et al., 2017).

Niedrigintensive Belastungszonen (Zone 1)

Die Ergebnisse in *Studie 3* in Bezug auf die Trainingsanteile in Z1 in Abhängigkeit von der Quantifizierungsmethode differieren von denen der zuvor besprochenen Studien im Rad- und Laufsport (Bellinger et al., 2020; D. Sanders et al., 2017). *Studie 3* fand signifikant höhere Anteile der Z1 für TID_{BLa-HF} verglichen mit TID_{BLa-V} , wogegen die anderen beiden Studien keine Unterschiede in Bezug auf die Z1 feststellen konnten. Dieser Unterschied zwischen der aktuellen Studie mit Kanurennsportler:innen und den Studien im Lauf- und Radsport lässt sich mit den Besonderheiten des Trainings im Kanurennsport erläutern. Die langen niedrigintensiven Grundlagenausdauereinheiten absolvieren Kanut:innen meist in Kleingruppen á zwei bis vier Sportler:innen, in denen ein/e Sportler:in vorweg fährt und den andere Gruppenmitgliedern rechts, links oder direkt hinter sich „eine Welle gibt“. Man spricht hier von „Welle fahren/surfen“, da die Sportler:innen hinter dem/der Gruppenführer:in deren/dessen Sog der Bugwelle nutzen, um mit geringerem Aufwand das Tempo zu halten. Das „Welle fahren“ ermöglicht bis zu 31,9% Energieeinsparung und es ergeben sich in Konsequenz deutlich geringere Blutlaktatspiegel sowie HF-Werte während der Ausdauerbelastung (Pérez-Landaluce et al., 1998). Im Grundlagenausdauertraining der Kanurennsportler:innen wird in der Regel alle fünf Minuten bzw. jeden Kilometer die Führungsposition gewechselt, sodass durchgängig ein hohes Durchschnittstempo gehalten werden kann, dass ggf. der schon Z2 entsprechen kann, während die HF jedoch niedrig (= Z1) bleibt. Somit ist zu vermuten, dass bei der TID_{BLa-V} der Anteil des Trainings in Z1 unter- und der Anteil in Z2 überbewertet ist. Zukünftige Studien zur TID im Kanurennsport sollten insofern bedenken, ob sie „Welle fahren“ im Rahmen der Untersuchung erlauben, oder ggf. einen anderen unabhängigeren Parameter (vgl. 3.2.4) für die Intensitätsbestimmung heranziehen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in Abhängigkeit von der Quantifizierungsmethode bei einer physiologisch basierten Intensitätszonenbestimmung die HF-Messung eher eine pyramidale TID (Bellinger et al., 2020; Esteve-Lanao et al., 2005; Lucía et al., 2000; Plews et al., 2014;

Schumacher & Mueller, 2002; Seiler & Kjerland, 2006; Sylta et al., 2014; Zapico et al., 2007) ergibt, wogegen externe Messparameter (Geschwindigkeit, Leistungsabgabe) (Bellinger et al., 2020) oder auch die „Session-Goal“ Methode (Campos et al., 2021; Sandbakk et al., 2011; Seiler & Kjerland, 2006) mit komplementierender HF-Messung eine polarisierte TID ergibt. Diese Abhängigkeit des Musters der TID von der Quantifizierungsmethode stellt sich über eine Reihe von Sportarten wie Laufen (Bellinger et al., 2020; Esteve-Lanao et al., 2005), Radfahren (Lucía et al., 2000; Schumacher & Mueller, 2002; Zapico et al., 2007), Skilanglauf (Seiler & Kjerland, 2006) und Rudern (Plews et al., 2014) dar.

3.2.3. Die Wahl der Quantifizierungsmethode in Abhängigkeit der Saisonphase

Insofern zeigen sich für sowohl für die TID_{BLa-HF} als auch für die TID_{BLa-V} wesentliche Nachteile bei der Analyse der TID von Kanurennsportler:innen. Die Ergebnisse aus *Studie 3* legen eine Kombination der Methoden nahe, wobei die TID_{BLa-HF} vorrangig für die Bestimmung von Z1 und Z2 und die TID_{BLa-V} für Z3 eingesetzt wird. Ohne Zweifel haben alle TID Quantifizierungsmethoden ihre Nachteile, weshalb die Propagierung einer einzelnen Methode nicht zielführend sein kann. Die HF scheint vor allem für die Quantifizierung von langandauernden Grundlagenausdauerheiten oder längeren Intervallbelastungen geeignet zu sein (Bellinger et al., 2020), wobei dennoch auch hier immer der Einfluss von Umwelteinflüssen bedacht werden muss (Gilman, 1996). Strategien wie die Orientierung der Quantifizierung am Hauptziel der Trainingsbelastung („Session Goal“ Methode) oder die Subtraktion der Pausenintervalle bei hochintensiven Intervallbelastungen haben das Potenzial die Genauigkeit der Quantifizierung der Z2 und Z3 basierend auf der HF zu erhöhen (Sylta et al., 2014).

Klassisch basiert die Einteilung von Intensitätszonen auf Grundlage von den physiologischen Anpassungen, die sie bewirken sollen (Kenneally et al., 2020), da weitgehend klar ist, dass die Zeit, die Athlet:innen in bestimmten physiologisch basierten Zonen verbringen, spezifische Anpassungen in Anlehnung an diese generiert (Stöggl & Sperlich, 2014). *Studie 3* konnte zudem darstellen, dass eine Quantifizierung der Trainingszonen anhand des Wettkampftempos eine weitere

Option insbesondere im Bereich der Wettkampfphase darstellen kann, wie auch zuvor schon bei Mittel- und Langstreckenläufern aufgezeigt wurde (Kenneally et al., 2020). Da die Wettkampfleistung im Kanurennsport letztendlich von der Interaktion diverser leistungsbezogenen Parameter abhängig ist (van Someren & Howatson, 2008), bietet die Orientierung der Trainingsintensität anhand des individuellen Trainingsziels in Bezug auf die Wettkampfleistung (Startfähigkeit, Streckentempo, Stehvermögen, etc.) einen Ansatz mit größerer Zielorientierung, verglichen mit Intensitätsvorgaben anhand von physiologischen Parametern. Nichtsdestotrotz bleibt auch die Analyse der TID auf Grundlage einer physiologischen Zoneneinteilung während der WP eine wichtige Informationsquelle, um einen Einblick in die primär beanspruchten Energiesysteme während des Trainingsprozesses zu gewinnen.

Grundsätzlich sollten sich Trainer:innen und Athlet:innen zunächst die Frage nach dem Hauptziel der aktuellen Trainingsphase stellen, bevor sie sich für bestimmte Quantifizierungsmethoden der Trainingsintensität entscheiden. Im Saisonverlauf während der AVP und SVP empfiehlt sich vorzugsweise eine TID Quantifizierung anhand physiologischer Kenngrößen. Dabei erscheint ein Mix aus HF-basierter Analyse für Z1 sowie für längere Belastungen in Z2 und geschwindigkeitsbasierter Analyse für Z3 sowie für kürzere Belastungen der Z2 zweckmäßig. In der Wettkampfvorbereitung stellt sich dann eine Zoneneinteilung anhand des Wettkampftempos als sinnvoll dar, unter anderem auch unter dem Gesichtspunkt des Trainingsprinzips der Spezifik (Plisk, 2005; Weineck, 2009). Dieses Prinzip berücksichtigt, neben den metabolischen Komponenten, die Vielseitigkeit der Einflüsse auf die Wettkampfleistung.

4. Zukünftiger Forschungsbedarf

4.1. Inter- und intraindividuelle Variabilität der Trainingsintensitätsverteilung

Die individuellen Veränderungen der TID der Athlet:innen im Verlauf der Saison in *Studie 2* zeigen im Vergleich mit Veränderung des Mittelwerts der Gesamtgruppe eine sehr starke Heterogenität. So haben einige Athlet:innen in der AVP extrem hohe Anteile des Trainings in Z1 verbracht (bis zu 94%) und entsprechend geringe Anteile in Z2 und Z3. Andere Athlet:innen wiederum trainierten deutlich weniger Zeit in Z1 (z.B. 61%) und folglich mehr Zeit in Z2 und Z3. Auch die intraindividuellen Schwankungen des Trainingsvolumens und der Verteilung der Intensität zeigen eine hohe Variabilität von Woche zu Woche über die gesamte Saison (Abbildung 7).

Aus diesen hochgradigen inter- und intraindividuellen Disparitäten ergibt sich die Frage nach dem Nutzen der Interpretation von Gruppenmittelwerten für allgemeine Trainingsempfehlungen. Beispielsweise bewirkten individuelle Unterschiede im Gesamttrainingsvolumen und im Volumen der hochintensiven Trainingsanteile bei gut trainierten Skilangläufern vergleichbare Veränderungen in der VO_{2max} , was auf den Bedarf nach hochindividualisierten Trainingsprogrammen hinweist (Johansen et al., 2021). Auch ein Vergleich der inter- und intraindividuellen Entwicklung von subjektivem Belastungs- und Erholungsempfinden bei Fußballern konnte deutlich größere (bis zu 7,6-fach) intraindividuelle als interindividuelle Schwankungen feststellen, was ebenso den Nutzen von Gruppenmittelwerten in Bezug auf die individuelle Trainingsplanung in Frage stellte (Neumann et al., 2021). In *Studie 3* konnte zudem dargestellt werden, dass die Athleten in Bezug auf ihr Wettkampftempo eine große Homogenität in Ihrer TID aufwiesen, bei der physiologisch bestimmten TID zeigte sich jedoch eine ausgeprägte Heterogenität. Daraus lässt sich schließen, dass jede/r Athlet:in für die Entwicklung seiner spezifischen Wettkampfleistung in anderen physiologischen Zonen arbeitet/arbeiten muss. Die hohe intraindividuelle Variation bei physiologischen Testungen allein durch Messfehler und biologische Faktoren (Umweltbedingungen, tageszyklische Variation, Schlafqualität, Ernährung, Stress, etc.) erschweren es

ebenso wahre interindividuelle Effekte von Trainingsprogrammen darzustellen (Chrzanowski-Smith et al., 2020).

Die aufgezeigten intra- und interindividuellen Varianzen in Bezug auf Trainingsgestaltung, Belastungs-/Erholungsempfinden und auch die resultierenden Leistungsanpassungen spiegeln unter anderem Unterschiede in genetischer Prädisposition, biomechanischen Charakteristika, physiologischen Profilen, biologischem Alter, Trainingserfahrung, physischer Alltagsaktivität, Regenerationsstrategien, Umweltbedingungen und psychologischem Stress wider (Bourgois et al., 2019; Kiely, 2018; Sperlich & Holmberg, 2017). In Summe scheint der erfolgreiche Umgang mit diversen Stressoren des individuellen Athleten eine größere Rolle für die Optimierung der kurz- wie auch langfristigen Leistungsentwicklung zu spielen als beispielsweise die Verteilung der Trainingsintensität in den diversen Phasen des Trainings. Die hohe Individualität in den Ergebnissen lässt zudem Zweifel an dem Mehrwert, der in den letzten Jahren vermehrt aufgetretenen Einzelfallstudien aufkommen, in denen über die TID einzelner sehr erfolgreicher Ausdauersportler:innen berichtet wurde (Kenneally et al., 2022; Rothschild et al., 2021; Schmitt et al., 2020; Solli et al., 2017; Tjelta, 2013; Tønnessen et al., 2014; Zeller et al., 2017). Aufgrund der dargestellten hohen Variabilität der TID, scheint ein Übertrag dieser Ergebnisse für allgemeine Trainingsempfehlung höchst unpraktisch. Burnley und Kollegen (2022) weisen bei diesen Einzelfallstudien u.a. auf den „survivorship bias“ hin, wobei die Empfehlungen auf der Praxis erfolgreicher Athleten beruhen und ignoriert wird, dass viele andere Athlet*innen den gleichen Trainingsansatz verfolgt habe, ohne ähnlich erfolgreich zu sein. Eine Untersuchung der Arbeitsgruppe um Johansen (2021) stellte fest, dass bei Athlet:innen, die ein Plateau in der Leistungsentwicklung erreicht haben, weniger eine spezielle TID als vielmehr grundsätzliche Veränderungen der TID und auch des Trainingsvolumens entscheidend sind, um weitere Entwicklungen anzustoßen. Diese Empfehlung geht eng mit dem Trainingsprinzip der Variabilität einher (Bompa & Haff, 2009).

4.2. Der Einfluss diverser (Alltags-)Belastungen auf die Gestaltung der Trainingsintensität

Der Einfluss verschiedenster Variablen auf die TID und deren Effekte lässt sich unter anderem auch an den Ergebnissen der *Studie 2* in der SVP darstellen. Die beschriebene Verschiebung der Verteilung der Trainingsintensität von der AVP bis zur WP war begleitet von einem Anstieg des spezifischen Gesamttrainingsumfang auf dem Wasser von ca. 1,5 Std. Ein möglicher Grund für die beschriebene Intensitäts- und Umfangsentwicklung ist, dass der Anstieg des Volumens den Bedarf an vermehrten niedrigintensiven Trainingseinheiten bedingt, um eine zu starke Ermüdung und ggf. Übertraining zu vermeiden (Guellich et al., 2009). Diese Verschiebung der Intensitätsverteilung zu geringeren Anteilen in Z2 und Z3 bei gleichzeitigem Anstieg des Gesamtvolumens war in den Beobachtungen aus *Studie 2* allerdings lediglich für die WP zu beobachten, obwohl bereits in der SVP ein Anstieg des Volumens zu verzeichnen war. Der simultane Anstieg von Volumen und Intensität führte zu diversen deutlichen positiven Leistungsanpassungen nach der SVP (vgl. Ergebnisse Studie 2). Diese Entwicklung steht im Gegensatz zum wissenschaftlichen Konsens, dass zur Vermeidung von exzessiver Ermüdung und Übertraining ein gesteigertes Volumen der hochintensiven Belastungen eine Reduzierung des Gesamtvolumens bedingt, um positive Anpassungen zu bewirken (Gaskill et al., 1999; Johansen et al., 2021; Støren et al., 2012). Eine mögliche Theorie ist, dass die deutlich verbesserten Möglichkeiten zur physischen wie auch psychischen Regeneration, während des COVID-19 bedingten Lockdowns im Zeitfenster der SVP, die Athlet:innen befähigt haben, trotz gestiegenem Trainingsvolumen, die Anteile der Z2 zu halten und der Z3 sogar zu steigern. So konnten wir in einer Substudie (Zinner et al., 2020) der aktuellen *Studie 2*, mit der gleichen Kohorte, darstellen, dass die Athlet:innen während des Lockdown mehr Zeit schlafend und im Bett liegend verbracht haben als vor dem Lockdown. Gleichzeitig hat sich die moderate bis intensive physische Aktivität im Alltag außerhalb des Trainings verringert, was in Summe auf eine verbesserte Regenerationsmöglichkeiten hinweist (Watson, 2017; Zinner et al., 2020). Diese Vermutung ist in Übereinstimmung mit der vermehrt auftretenden wissenschaftlichen Meinung, dass ein holistischer Ansatz bei der Analyse von die Leistung beeinflussenden Faktoren (z.B. Schlaf, Alltagsaktivität, Ernährung, Stress,

etc.) von Nöten ist, um Effekte bestimmter Trainingsmethoden, wie auch der Intensitätszonenverteilung, zu bewerten (Bourgois et al., 2019; Kiely, 2018; Sperlich & Holmberg, 2017).

Die Ergebnisse und Erkenntnisse bezüglich der hohen inter- und intraindividuellen Schwankungen (Punkt 4.1) sowie der hier besprochenen Einflüsse der Alltagsaktivität zeigen außerdem sehr deutlich die Grenzen des unter 1.3.1 besprochenen kybernetischen Modells auf. Die Komplexität des Trainingsprozesses, der Einflussfaktoren auf die individuelle Trainingsgestaltung sowie die individuellen Anpassungen machen deutlich, dass der Trainingsprozess unmöglich mit einem so vereinfachten Regelkreismodell beschrieben und umgesetzt werden kann. Ein einfacher Soll-Ist-Vergleich im Zusammenhang mit der Leistungsentwicklung ermöglicht nicht die Flexibilität, die notwendig ist, um den individuellen Trainingsprozess gezielt zu gestalten bzw. die Effekte von Training zu verstehen. Für die allumfassende Beschreibung des Trainingsprozesses bedarf es der Integration und Verschmelzung verschiedener psycho-sozialer und biologischer Modelle, die wiederum eine vereinfachte mathematische Beschreibung der Zusammenhänge unmöglich erscheinen lassen.

4.3. Forschung zur Trainingsintensitätsverteilung von Frauen

In den letzten Jahren wurde vermehrt darauf hingewiesen, dass Frauen in sportwissenschaftlichen Untersuchungen stark unterrepräsentiert sind und viele Aussagen über die Effekte von Trainingsinterventionen aktuell nicht einfach auf Frauen übertragen werden können (Cowley et al., 2021). Auch die Forschung im Bereich der TID stellt hier keine Ausnahme dar. Studien weisen darauf hin, dass sich traditionelle Parameter der Belastungsintensität (z.B. HF, VO₂) zwischen Männern und Frauen unterscheiden (Rascon et al., 2020) und hochintensive Intervalltrainingsprogramme spezifisch auf Geschlechter abgestimmt werden sollten (Schmitz et al., 2020).

So fand eine der wenigen TID-Studien mit einem Geschlechtervergleich bei Straßenradrennfahrerinnen ein deutlich geringeres Trainingsvolumen mit gleichzeitig deutlich höheren Intensitäten im Vergleich zu den männlichen Athleten (Erp et al., 2019). Diese Unterschiede schrieben die Autoren jedoch insbesondere

den unterschiedlichen Renndistanzen zwischen Männern und Frauen zu sowie der geringeren verfügbaren Zeit zum Training für die eher semi-professionell trainierenden Frauen verglichen mit den männlichen Vollzeitprofis (Erp et al., 2019). In der ursprünglichen Studienkohorte der TID-Untersuchungen im Kanurennsport im Rahmen dieser Promotionsarbeit war insofern ein Vergleich zwischen männlichen und weiblichen Kanurennsportler:innen vorgesehen. Bedauerlicherweise war die letztendliche Kohorte, die vollständige Daten zur Analyse lieferte, für eine statistische Untersuchung von Genderunterschieden im Verhältnis von Frauen zu Männern zu unausgewogen und insgesamt zu klein. Im Kanurennsport differieren beispielsweise auch die olympischen Wettkampfdistanzen, wobei Frauen ausschließlich die beiden kürzeren Strecken (200/500 m) absolvieren und Männer alle drei Distanzen (200/500/1000 m). Zudem zeigen sich größere Unterschiede in den Krafftähigkeiten und auch der Physiologie der Oberkörpermuskulatur zwischen den Geschlechtern im Vergleich mit der Unterkörpermuskulatur (P. Bishop et al., 1987; Miller et al., 1993), was auf die Trainingsgestaltung im Kanurennsport einen Effekt haben könnte. Eine Studie mit Skilangläufern konnte aufzeigen, dass mit steigender Belastungsintensität bei einer reinen Oberkörperbelastung („Double Poling“ im Sitzen) die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der erbrachten Leistungsabgabe signifikant größer wurden (Hegge et al., 2015). Die Autoren wiesen hier aber auch darauf hin, dass es insbesondere im Oberkörpertraining zwischen Männern und Frauen einen Unterschied gab, der einen Einfluss auf diese große Diskrepanz haben könnte.

Zum aktuellen Zeitpunkt ist es nicht möglich, eine Aussage darüber zu treffen, inwiefern sich die TID zwischen Männern und Frauen im Kanurennsport oder im Ausdauersport allgemein unterscheidet und welche Faktoren mögliche Gründe für Unterschiede sein könnten. Grundsätzlich lassen Unterschiede in der Wettkampfbelastung, der Physiologie und auch den Krafftähigkeiten mögliche Differenzen zwischen den Geschlechtern vermuten. Auch hier muss allerdings bedacht werden, dass weitaus mehr Faktoren einen Einfluss auf die TID und deren Effekte haben und ein holistischer Betrachtungsansatz von Nöten ist. Zukünftige Forschung zur TID im Kanurennsport sollte aber insbesondere auch Unterschiede zwischen den Geschlechtern erforschen.

5. Fazit

Die in *Studie 1* gefundenen Unterschiede in der VO_2 , der Muskeloxygenierung im *M. biceps brachii* sowie im subjektiven Belastungsempfinden zwischen einer Leistungsdiagnostik auf dem Wasser und auf dem Ergometer weisen darauf hin, dass letztere die Belastungen im Kanurensport nicht adäquat imitiert und somit in ihrer Aussagekraft für die spezifische Trainingsanalyse und -planung zu hinterfragen ist.

Aus den Ergebnissen der *Studien 2 und 3* lassen sich zusammenfassend folgende Kernaussagen über die Trainingsintensitätsverteilung im Kanurensport im Gesamtkontext des Ausdauersport im Allgemeinen formulieren:

- (1) Die TID variiert im Saisonverlauf und zeigt im Mittel einen hohen Anteil des niedrigintensiven Trainings (80–90%), wobei in der Vorbereitungsphase die Verteilung der moderaten bis intensiven Trainingsbereiche eine pyramidale TID-Struktur aufzeigen ($Z1 > Z2 > Z3$), die in der Wettkampfvorbereitung eine Tendenz zu einer polarisierten Struktur ($Z1 > Z3 > Z2$) entwickelt.
- (2) Die TID im Kanurensport stellt sich somit ähnlich dar, wie in Sportarten, die Ober- bzw. Ober- und Unterkörper bei der Vortriebsgenerierung einsetzen. Es ist zu vermuten, dass der geringe Impact auf das Skelettmuskelsystem und die damit einhergehende Möglichkeit hohe Trainingsvolumen mit der vergleichsweise kleinen Oberkörpermuskulatur zu verwirklichen, diese TID-Struktur bedingen. Die TID sollte insofern nicht einzig als Verhältnis zwischen den Trainingszonen dargestellt werden, sondern auch in Bezug mit dem Gesamtvolumen betrachtet werden.
- (3) Die Wahl der Quantifizierungsmethode (extern vs. intern; basiert auf physiologischen Parametern vs. Wettkampfgeschwindigkeit) beeinflusst die Darstellung der TID. Für eine adäquate Vergleichbarkeit und den gezielten Einsatz muss insofern in der Forschung, wie auch in den Sportarten ein Konsens über Wahl der Quantifizierungsmethode erarbeitet werden.
- (4) Es empfiehlt sich die Wahl der Quantifizierungsmethode anhand des Trainingsziels bzw. der Saisonphase zu orientieren. Aufgrund der aktuellen Ergebnisse erscheint bei den in den *Studien 2 und 3* eingesetzten Quantifizierungsmethoden (HF & Geschwindigkeit) im Kanurensport in der

AVP und SVP eine Quantifizierung anhand physiologischer Kenngrößen sinnvoll, wobei ein Mix aus HF-basierter Analyse für Z1 sowie für längere Belastungen in Z2 und geschwindigkeitsbasierter Analyse für Z3 sowie kürzere Belastungen der Z2 zweckmäßig ist. In der Wettkampfvorbereitung stellt sich dann eine Zoneneinteilung anhand des Wettkampftempos als sinnvoll dar.

Basierend auf den aktuellen Erkenntnissen stellen sich verschiedene Forschungsfragen für die Zukunft heraus:

- (1) Welchen Einfluss hat das absolvierte Gesamttrainingsvolumen bzw. der Impact der jeweiligen Sportart auf das Skelettmuskelsystem auf die Gestaltung der TID und deren Effekte?
- (2) Welche TID Struktur weist in Abhängigkeit von der Saisonphase, bzw. dem Trainingsziel Vorteile im Sinne einer sich potenzierenden Leistungsentwicklung zum Saisonhöhepunkt auf?
- (3) Wie können die inter- und intraindividuellen Unterschiede der TID genutzt werden, um individuelle Empfehlungen für den spezifischen Athleten zu formen?
- (4) Wie lässt sich ein holistischer Betrachtungsansatz (spezifisches Training, unspezifisches Training, Alltagsaktivität, psychischer Stress) im Trainingsalltag im Ausdauersport realisieren und welchen Mehrwert liefert er im Vergleich zu einer reinen Betrachtung der Belastungen im Training der Sportart?
- (5) Unterscheidet sich die TID im Ausdauersport zwischen Männern und Frauen?

6. Literaturverzeichnis

- Bagger, M., Petersen, P. H., & Pedersen, P. K. (2003). Biological variation in variables associated with exercise training. *International Journal of Sports Medicine*, 24(6), 433–440. <https://doi.org/10.1055/s-2003-41180>
- Bakdash, J. Z., & Marusich, L. R. (2017). Repeated Measures Correlation. *Frontiers in Psychology*, 8, 456. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00456>
- Baldassarre, R., Bonifazi, M., Meeusen, R., & Piacentini, M. F. (2019). The Road to Rio: A Brief Report of Training-Load Distribution of Open-Water Swimmers During the Olympic Season. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(2), 260–264. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0845>
- Bangsbo, J., Elbe, A. M., Andersen, M., & Poulsen, A. L. (2010). International Consensus Conference „Performance in top sports involving intense exercise“. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20 Suppl 2, ii–iv. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01183.x>
- Banister, E. W., Calvert, T. W., Savage, M. V., & Bach, T. (1975). A systems model of training for athletic performance. *Aust J Sports Med*, 7(3), 57–61.
- Barnes, C. A., & Adams, P. C. (1998). Reliability and criterion validity of a 120 s maximal sprint on a kayak ergometer. *J Sport Sci*, 16(1), 25–26.
- Beaver, W. L., Wasserman, K., & Whipp, B. J. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal of Applied Physiology*, 60(6), 2020–2027. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.6.2020>
- Bell, G., Attwood, K., Syrotuik, D., & Quinney, H. A. (1998). Comparison of the physiological adaptations to high vs. Low stroke rate training in rowers. *Sports Medicine, Training and Rehabilitation*, 8(2), 113–122. <https://doi.org/10.1080/15438629809512521>
- Bellinger, P., Arnold, B., & Minahan, C. (2020). Quantifying the Training-Intensity Distribution in Middle-Distance Runners: The Influence of Different Methods of Training-Intensity Quantification. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(3), 319–323. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0298>
- Billat, L. V. (2001). Interval training for performance: A scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part II: anaerobic interval training. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 31(2), 75–90.
- Bishop, D. (2000). Physiological predictors of flat-water kayak performance in women. *European Journal of Applied Physiology*, 82(1–2), 91–97.
- Bishop, P., Cureton, K., & Collins, M. (1987). Sex difference in muscular strength in equally-trained men and women. *Ergonomics*, 30(4), 675–687. <https://doi.org/10.1080/00140138708969760>
- Bjerkefors, A., Tarassova, O., Rosén, J. S., Zakaria, P., & Arndt, A. (2018). Three-dimensional kinematic analysis and power output of elite flat-water kayakers. *Sports Biomechanics*, 17(3), 414–427. <https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1359330>
- Bompa, T. O., & Haff, G. (2009). *Periodization: Theory and Methodology of Training*. Human Kinetics.
- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of*

Rehabilitation Medicine, 2(2), 92–98.

- Borges, T. O., Bullock, N., Duff, C., & Coutts, A. J. (2014). Methods for quantifying training in sprint kayak. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(2), 474–482. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31829b56c4>
- Borges, T. O., Dascombe, B., Bullock, N., & Coutts, A. J. (2015). Physiological characteristics of well-trained junior sprint kayak athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(5), 593–599. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0292>
- Borresen, J., & Lambert, M. I. (2009). The quantification of training load, the training response and the effect on performance. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 39(9), 779–795. <https://doi.org/10.2165/11317780-000000000-00000>
- Bourgois, J., Bourgois, G., & Boone, J. (2019). Perspectives and Determinants for Training-Intensity Distribution in Elite Endurance Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(8), 1151–1156. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0722>
- Bourgois, J., Steyaert, A., & Boone, J. (2014). Physiological and Anthropometric Progression in an International Oarsman: A 15-Year Case Study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(4), 723–726. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0267>
- Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 43(5), 313–338.
- Bullock, N., Woolford, S. M., Peeling, P., & Bonetti, D. L. (2013). Sprint kayak Athletes. *Physiological Tests for Elite Athletes*, 421–433.
- Burnley, M., Bearden, S. E., & Jones, A. M. (2022). Polarized Training is Not Optimal for Endurance Athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002869>
- Byrnes, W. C., & Kearney, J. T. (1997). Aerobic and anaerobic contributions during simulated canoe/kayak sprint events. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29(Supplement), 220.
- Calbet, J. a. L., Holmberg, H.-C., Rosdahl, H., van Hall, G., Jensen-Urstad, M., & Saltin, B. (2005). Why do arms extract less oxygen than legs during exercise? *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 289(5), R1448–R1458. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00824.2004>
- Campos, Y., Casado, A., Vieira, J. G., Guimarães, M., Sant'Ana, L., Leitão, L., Silva, S. F. da, Azevedo, P. H. S. M. de, Vianna, J., & Domínguez, R. (2021). Training-intensity Distribution on Middle- and Long-distance Runners: A Systematic Review. *International Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1055/a-1559-3623>
- Carl, K. (1983). *Training und Trainingslehre in Deutschland: Theoretische und empirische Untersuchung zur Entwicklung des Trainings im 19. Und 20. Jahrhundert dargestellt am Beispiel der Sportarten Kunstturnen und Leichathletik*. Hofmann.
- Carrasco Páez, L., Martínez Díaz, I. C., Hoyo Lora, M. del, Sañudo Corrales, F. de B., & Ochiana, N. (2010). Ergometric testing for top-level kayakers: Validity and reliability of a discontinuous graded exercise test. *Kinesiologia Slovenica*, 16.
- Chrzanowski-Smith, O. J., Piatrikova, E., Betts, J. A., Williams, S., & Gonzalez, J. T. (2020).

- Variability in exercise physiology: Can capturing intra-individual variation help better understand true inter-individual responses? *European Journal of Sport Science*, 20(4), 452–460. <https://doi.org/10.1080/17461391.2019.1655100>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. L. Erlbaum Associates.
- Conconi, F., Ferrari, M., Ziglio, P. G., Droghetti, P., & Codeca, L. (1982). Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 52(4), 869–873. <https://doi.org/10.1152/jappl.1982.52.4.869>
- Cowley, E. S., Olenick, A. A., McNulty, K. L., & Ross, E. Z. (2021). “Invisible Sportswomen”: The Sex Data Gap in Sport and Exercise Science Research. *Women in Sport and Physical Activity Journal*, 29(2), 146–151. <https://doi.org/10.1123/wspaj.2021-0028>
- Coyle, E. F., Feltner, M. E., Kautz, S. A., Hamilton, M. T., Montain, S. J., Baylor, A. M., Abraham, L. D., & Petrek, G. W. (1991). Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(1), 93–107.
- Daussin, F. N., Ponsot, E., Dufour, S. P., Lonsdorfer-Wolf, E., Doutreleau, S., Geny, B., Piquard, F., & Richard, R. (2007). Improvement of VO₂max by cardiac output and oxygen extraction adaptation during intermittent versus continuous endurance training. *European Journal of Applied Physiology*, 101(3), 377–383. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0499-3>
- Davis, J. A., Vodak, P., Wilmore, J. H., Vodak, J., & Kurtz, P. (1976). Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *Journal of Applied Physiology*, 41(4), 544–550. <https://doi.org/10.1152/jappl.1976.41.4.544>
- Dekerle, J., Vanhatalo, A., & Burnley, M. (2008). Determination of critical power from a single test. *Science & Sports*, 23(5), 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2007.06.015>
- dos Santos, J. A. R., & da Silva, A. V. (2010). Correlation between strength and kayaking performance in water. *Journal of sport and health research*, 2(2), 6.
- Erp, T. van, Sanders, D., & Koning, J. J. de. (2019). Training Characteristics of Male and Female Professional Road Cyclists: A 4-Year Retrospective Analysis. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(4), 534–540. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0320>
- Esteve-Lanao, J., San Juan, A. F., Earnest, C. P., Foster, C., & Lucia, A. (2005). How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(3), 496–504. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000155393.78744.86>
- Ferrero, F. (Hrsg.). (2006). *The British Canoe Union Coaching Handbook*. Pesda Press.
- Filipas, L., Bonato, M., Gallo, G., & Codella, R. (2021). Effects of 16 weeks of pyramidal and polarized training intensity distributions in well-trained endurance runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. <https://doi.org/10.1111/sms.14101>
- Fiskerstrand, Å., & Seiler, K. S. (2004). Training and performance characteristics among Norwegian International Rowers 1970–2001. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 14(5), 303–310. <https://doi.org/10.1046/j.1600-0838.2003.370.x>
- Fleming, N., Donne, B., & Fletcher, D. (2012). Effect of kayak ergometer elastic tension on upper limb EMG activity and 3D kinematics. *Journal of Sports Science & Medicine*, 11(3), 430–437.
- Fleming, N., Donne, B., Fletcher, D., & Mahony, N. (2012). A biomechanical assessment of

- ergometer task specificity in elite flatwater kayakers. *Journal of Sports Science & Medicine*, 11(1), 16–25.
- Foster, C., Casado, A., Esteve-Lanao, J., Haugen, T., & Seiler, S. (2022). Polarized Training is Optimal for Endurance Athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002871>
- Fry, R. W., & Morton, A. R. (1991). Physiological and kinanthropometric attributes of elite flatwater kayakists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 23(11), 1297–1301.
- García-Pallarés, J., García-Fernández, M., Sánchez-Medina, L., & Izquierdo, M. (2010). Performance changes in world-class kayakers following two different training periodization models. *European journal of applied physiology*, 110(1), 99–107.
- García-Pallarés, J., Sánchez-Medina, L., Carrasco, L., Díaz, A., & Izquierdo, M. (2009). Endurance and neuromuscular changes in world-class level kayakers during a periodized training cycle. *European journal of applied physiology*, 106(4), 629–638.
- Gaskill, S. E., Serfass, R. C., Bacharach, D. W., & Kelly, J. M. (1999). Responses to training in cross-country skiers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(8), 1211–1217. <https://doi.org/10.1097/00005768-199908000-00020>
- Gejl, K. D., Hvid, L. G., Andersson, E. P., Jensen, R., Holmberg, H.-C., & Ørtenblad, N. (2021). Contractile Properties of MHC I and II Fibers From Highly Trained Arm and Leg Muscles of Cross-Country Skiers. *Frontiers in Physiology*, 12, 855. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.682943>
- Gilman, M. B. (1996). The use of heart rate to monitor the intensity of endurance training. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 21(2), 73–79. <https://doi.org/10.2165/00007256-199621020-00001>
- González-Ravé, J. M., Hermosilla, F., González-Mohíno, F., Casado, A., & Pyne, D. B. (2021). Training Intensity Distribution, Training Volume, and Periodization Models in Elite Swimmers: A Systematic Review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(7), 913–926. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0906>
- Guellich, A., Seiler, S., & Emrich, E. (2009). Training Methods and Intensity Distribution of Young World-Class Rowers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 4(4), 448–460. <https://doi.org/10.1123/ijsp.4.4.448>
- Haddad, M., Padulo, J., & Chamari, K. (2014). The Usefulness of Session Rating of Perceived Exertion for Monitoring Training Load Despite Several Influences on Perceived Exertion. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(5), 882–883. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0010>
- Haddad, M., Stylianides, G., Djaoui, L., Dellal, A., & Chamari, K. (2017). Session-RPE Method for Training Load Monitoring: Validity, Ecological Usefulness, and Influencing Factors. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 612. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00612>
- Haff, G. G., & Triplett, N. T. (2015). *Essentials of Strength Training and Conditioning 4th Edition*. Human kinetics.
- Halson, S. L. (2014). Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.z.)*, 44(Suppl 2), 139–147. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0253-z>
- Hartmann, U., Mader, A., & Hollmann, W. (1990). *Heart rate and lactate during endurance training programs in rowing and its relation to the duration of exercise by top elite rowers*. 1, 1–4.

- Hegge, A. M., Myhre, K., Welde, B., Holmberg, H.-C., & Sandbakk, Ø. (2015). Are Gender Differences in Upper-Body Power Generated by Elite Cross-Country Skiers Augmented by Increasing the Intensity of Exercise? *PLOS ONE*, *10*(5), e0127509. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127509>
- Helge, J. W. (2010). Arm and leg substrate utilization and muscle adaptation after prolonged low-intensity training. *Acta Physiologica*, *199*(4), 519–528. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2010.02123.x>
- Helgerud, J., Høydal, K., Wang, E., Karlsen, T., Berg, P., Bjerkaas, M., Simonsen, T., Helgesen, C., Hjorth, N., Bach, R., & Hoff, J. (2007). Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(4), 665–671. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3180304570>
- Hogan, C., Binnie, M. J., Doyle, M., Lester, L., & Peeling, P. (2019). Comparison of Training Monitoring and Prescription Methods in Sprint Kayaking. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *15*(5), 654–662. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0190>
- Hogan, C., Binnie, M. J., Doyle, M., Lester, L., & Peeling, P. (2020). Heart rate and stroke rate misrepresent supramaximal sprint kayak training as quantified by power. *European Journal of Sport Science*, *0*(0), 1–10. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1771430>
- Hohmann, A., & Lames, M. (2002). Der propositionale Gehalt der Trainingsprinzipien und ihr Beitrag zur modernen Konzepten der Trainingssteuerung. *Trainingsprinzipien. Fundament der Trainingswissenschaft*, 29–42.
- Hohmann, A., Lames, M., & Letzelter, M. (2014). *Einführung in die Trainingswissenschaft* (6. Aufl.). Limpert.
- Isorna Folgar, M., Alacid Cárceles, F., & Mangas, J. J. R. (Hrsg.). (2015). *Training sprint canoeing*. 2.0 Editora. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1447.3684>
- Jackson, P. S. (1995). Performance prediction for Olympic kayaks. *Journal of Sports Sciences*, *13*(3), 239–245. <https://doi.org/10.1080/02640419508732233>
- Jahn, C., Winkler, D., & Witt, M. (2011). *Zur Kinetik des Paddelschlags bei Wettkampfgeschwindigkeiten im Kanurennsport auf der 200-m-Sprintstrecke bei den Kajakerren* (S. S. 229-233).
- Johansen, J.-M., Sunde, A., Helgerud, J., Gjerløw, L. E., & Støren, Ø. (2021). Effects of Individual Changes in Training Distribution on Maximal Aerobic Capacity in Well-Trained Cross-Country Skiers: A Follow-Up Study. *Frontiers in Physiology*, *12*, 926. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.675273>
- Jones, A. M., & Carter, H. (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *29*(6), 373–386. <https://doi.org/10.2165/00007256-200029060-00001>
- Joyner, M. J., & Lundby, C. (2018). Concepts About V'O₂max and Trainability Are Context Dependent. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *46*(3), 138–143. <https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000150>
- Kahl, J. (2005). DKV-Rahmentrainingskonzeption–Kanurennsport und Kanuslalom. *Duisburg: Deutscher Kanu-Verband-Wirtschafts-und Verlags GmbH*.

- Kenneally, M., Casado, A., Gomez-Ezeiza, J., & Santos-Concejero, J. (2020). Training intensity distribution analysis by race pace vs. Physiological approach in world-class middle- and long-distance runners. *European Journal of Sport Science*, 0(0), 1–8. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1773934>
- Kenneally, M., Casado, A., Gomez-Ezeiza, J., & Santos-Concejero, J. (2022). Training Characteristics of a World Championship 5000-m Finalist and Multiple Continental Record Holder Over the Year Leading to a World Championship Final. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(1), 142–146. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0114>
- Kenneally, M., Casado, A., & Santos-Concejero, J. (2018). The Effect of Periodization and Training Intensity Distribution on Middle- and Long-Distance Running Performance: A Systematic Review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(9), 1114–1121. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0327>
- Kiely, J. (2018). Periodization Theory: Confronting an Inconvenient Truth. *Sports Medicine*, 48(4), 753–764. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0823-y>
- Kindermann, W., Simon, G., & Keul, J. (1979). The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 42(1), 25–34. <https://doi.org/10.1007/BF00421101>
- Klitgaard, K. K., Hauge, C., Oliveira, A. S., & Heinen, F. (2021). A kinematic comparison of on-ergometer and on-water kayaking. *European Journal of Sport Science*, 21(10), 1375–1384. <https://doi.org/10.1080/17461391.2020.1831617>
- Laursen, P. B. (2010). Training for intense exercise performance: High-intensity or high-volume training? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20 Suppl 2, 1–10.
- Letzelter, M. (1978). *Trainingsgrundlagen: Training, Technik, Taktik*. Rowohlt Reinbek bei Hamburg.
- Liste der Olympiasieger im Kanusport/Nationenwertungen. (2021). In *Wikipedia*. https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_der_Olympiasieger_im_Kanusport/Nationenwertungen&oldid=214561619
- Lucía, A., Hoyos, J., Pardo, J., & Chicharro, J. L. (2000). Metabolic and Neuromuscular Adaptations to Endurance Training in Professional Cyclists: A Longitudinal Study. *The Japanese Journal of Physiology*, 50(3), 381–388. <https://doi.org/10.2170/jjphysiol.50.381>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2230-7>
- Mader, A., & Heck, H. (1986). A theory of the metabolic origin of „anaerobic threshold“. *International Journal of Sports Medicine*, 7 Suppl 1, 45–65.
- Matzka, M., Leppich, R., Holmberg, H.-C., Sperlich, B., & Zinner, C. (2022). The Relationship Between the Distribution of Training Intensity and Performance of Kayak and Canoe Sprinters: A Retrospective Observational Analysis of One Season of Competition. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fspor.2021.788108>
- Matzka, M., Leppich, R., Sperlich, B., & Zinner, C. (2022). Retrospective Analysis of Training Intensity Distribution Based on Race Pace Versus Physiological Benchmarks in Highly Trained

- Sprint Kayakers. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40798-021-00382-y>
- Matzka, M., Zinner, C., Kunz, P., Holmberg, H.-C., & Sperlich, B. (2021). Comparison of Physiological Parameters During On-Water and Ergometer Kayaking and Their Relationship to Performance in Sprint Kayak Competitions. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(aop), 1–7. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0912>
- Maw, G. J., Boutcher, S. H., & Taylor, N. A. (1993). Ratings of perceived exertion and affect in hot and cool environments. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 67(2), 174–179. <https://doi.org/10.1007/BF00376663>
- McKay, B. R., Paterson, D. H., & Kowalchuk, J. M. (2009). Effect of short-term high-intensity interval training vs. Continuous training on O₂ uptake kinetics, muscle deoxygenation, and exercise performance. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 107(1), 128–138. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90828.2008>
- McKean, M. R., & Burkett, B. J. (2014). The influence of upper-body strength on flat-water sprint kayak performance in elite athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(4), 707–714.
- Michael, J. S., Smith, R., & Rooney, K. B. (2009). Determinants of kayak paddling performance. *Sports Biomechanics*, 8(2), 167–179. <https://doi.org/10.1080/14763140902745019>
- Midgley, A. W., McNaughton, L. R., & Wilkinson, M. (2006). Is there an optimal training intensity for enhancing the maximal oxygen uptake of distance runners?: Empirical research findings, current opinions, physiological rationale and practical recommendations. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 36(2), 117–132. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636020-00003>
- Miller, A. E. J., MacDougall, J. D., Tarnopolsky, M. A., & Sale, D. G. (1993). Gender differences in strength and muscle fiber characteristics. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 66(3), 254–262. <https://doi.org/10.1007/BF00235103>
- Mitchell, A. (1998). Comparison of cardiorespiratory responses to open-water and simulated kayaking. *Biology of Sport*, 15(4), S. 229-236.
- Mujika, I. (2010). Intense training: The key to optimal performance before and during the taper. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(s2), 24–31. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01189.x>
- Mujika, I. (2017). Quantification of Training and Competition Loads in Endurance Sports: Methods and Applications. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(s2), S2-17. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0403>
- Mujika, I., Chatard, J. C., Busso, T., Geysant, A., Barale, F., & Lacoste, L. (1995). Effects of training on performance in competitive swimming. *Canadian Journal of Applied Physiology = Revue Canadienne De Physiologie Appliquee*, 20(4), 395–406. <https://doi.org/10.1139/h95-031>
- Neal, C. M., Hunter, A. M., Brennan, L., O'Sullivan, A., Hamilton, D. L., DeVito, G., & Galloway, S. D. R. (2013). Six weeks of a polarized training-intensity distribution leads to greater physiological and performance adaptations than a threshold model in trained cyclists. *Journal of Applied Physiology*, 114(4), 461–471. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00652.2012>
- Neal, C. M., Hunter, A. M., & Galloway, S. D. R. (2011). A 6-month analysis of training-intensity distribution and physiological adaptation in Ironman triathletes. *Journal of Sports Sciences*,

- 29(14), 1515–1523. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.596217>
- Neumann, N. D., Yperen, N. W. V., Brauers, J. J., Frencken, W., Brink, M. S., Lemmink, K. A. P. M., Meerhoff, L. A., & Hartigh, R. J. R. D. (2021). Nonergodicity in Load and Recovery: Group Results Do Not Generalize to Individuals. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(aop), 1–9. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0126>
- Nybo, L., Schmidt, J. F., Fritzdorf, S., & Nordsborg, N. B. (2014). Physiological Characteristics of an Aging Olympic Athlete. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 46(11), 2132–2138. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000331>
- Orie, J., Hofman, N., Koning, J. J. de, & Foster, C. (2014). Thirty-Eight Years of Training Distribution in Olympic Speed Skaters. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(1), 93–99. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0427>
- Ørtenblad, N., Nielsen, J., Boushel, R., Söderlund, K., Saltin, B., & Holmberg, H.-C. (2018). The Muscle Fiber Profiles, Mitochondrial Content, and Enzyme Activities of the Exceptionally Well-Trained Arm and Leg Muscles of Elite Cross-Country Skiers. *Frontiers in Physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01031>
- 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*, 1–9. <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. <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, V'O₂ and Performance in Elite Sprint Kayakers. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2. <https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00047>
- Pérez-Landaluce, J., Rodríguez-Alonso, M., Fernandez-Garcia, B., Bustillo-Fernandez, E., & Terrados, N. (1998). Importance of wash riding in kayaking training and competition. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(12), 1721–1724.
- Perez-Suarez, I., Martin-Rincon, M., Gonzalez-Henriquez, J. J., Fezzardi, C., Perez-Regalado, S., Galvan-Alvarez, V., Juan-Habib, J. W., Morales-Alamo, D., & Calbet, J. A. L. (2018). Accuracy and Precision of the COSMED K5 Portable Analyser. *Frontiers in Physiology*, 9, 1764. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01764>
- 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>
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2014). Heart-Rate Variability and Training-Intensity Distribution in Elite Rowers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(6), 1026–1032. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0497>
- Plisk, S. (2005). Training Principles and Program Design. *Strategies*, 18(4), 16–21. <https://doi.org/10.1080/08924562.2005.10591146>
- Rascon, J., Trujillo, E., Morales-Acuña, F., & Gurovich, A. N. (2020). Differences between Males and Females in Determining Exercise Intensity. *International Journal of Exercise Science*, 13(4), 1305–1316.

- Robinson, D. M., Robinson, S. M., Hume, P. A., & Hopkins, W. G. (1991). Training intensity of elite male distance runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 23(9), 1078–1082.
- Romijn, J. A., Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Gastaldelli, A., Horowitz, J. F., Endert, E., & Wolfe, R. R. (1993). Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *The American Journal of Physiology*, 265(3 Pt 1), E380-391. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1993.265.3.E380>
- Rothschild, J. A., Delcourt, M., Maunder, E., & Plews, D. J. (2021). Racing and Training Physiology of an Elite Ultra-Endurance Cyclist: Case Study of 2 Record-Setting Performances. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(5), 739–743. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0515>
- Sandbakk, Ø., Haugen, T., & Ettema, G. (2021). The Influence of Exercise Modality on Training Load Management. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(4), 605–608. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2021-0022>
- Sandbakk, Ø., Holmberg, H.-C., Leirdal, S., & Ettema, G. (2011). The physiology of world-class sprint skiers. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(6), e9–e16. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01117.x>
- Sanders, D., Myers, T., & Akubat, I. (2017). Training-Intensity Distribution in Road Cyclists: Objective Versus Subjective Measures. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(9), 1232–1237. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0523>
- Sanders, R., & Baker, J. (1998). Evolution of technique in flatwater kayaking. In *Science & Practice of Canoe/Kayak High-Performance Training* (S. 67–81). Elite Sport Department, Wingate Institute for Physical Education and Sport.
- Schmitt, L., Bouthiaux, S., & Millet, G. P. (2020). Eleven Years' Monitoring of the World's Most Successful Male Biathlete of the Last Decade. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–6. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0148>
- Schmitz, B., Niehues, H., Thorwesten, L., Klose, A., Krüger, M., & Brand, S.-M. (2020). Sex Differences in High-Intensity Interval Training—Are HIIT Protocols Interchangeable Between Females and Males? *Frontiers in Physiology*, 11, 38. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00038>
- Schnabel, G. (2008). *Trainingslehre-Trainingswissenschaft: Leistung-Training-Wettkampf*. Meyer & Meyer Verlag.
- Schumacher, Y. O., & Mueller, P. (2002). The 4000-m team pursuit cycling world record: Theoretical and practical aspects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(6), 1029–1036. <https://doi.org/10.1097/00005768-200206000-00020>
- Seiler, S. (2010). What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(3), 276–291.
- Seiler, S., & Kjerland, G. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: Is there evidence for an „optimal“ distribution? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 16(1), 49–56. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2004.00418.x>
- Seiler, S., & Tønnessen, E. (2009). *Intervals, Thresholds, and Long Slow Distance: The Role of Intensity and Duration in Endurance Training*. <http://www.sportsci.org/2009/ss.htm>
- Sjödín, B., & Jacobs, I. (1981). Onset of Blood Lactate Accumulation and Marathon Running

- Performance. *International Journal of Sports Medicine*, 02(01), 23–26. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1034579>
- Sjödén, B., Jacobs, I., & Svedenhag, J. (1982). Changes in onset of blood lactate accumulation (OBLA) and muscle enzymes after training at OBLA. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 49(1), 45–57. <https://doi.org/10.1007/BF00428962>
- Solli, G. S., Tønnessen, E., & Sandbakk, Ø. (2017). The Training Characteristics of the World's Most Successful Female Cross-Country Skier. *Frontiers in Physiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.01069>
- Sperlich, B., & Holmberg, H.-C. (2017). The Responses of Elite Athletes to Exercise: An All-Day, 24-h Integrative View Is Required! *Frontiers in Physiology*, 8, 564. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00564>
- Stegmann, H., Kindermann, W., & Schnabel, A. (1981). Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *International Journal of Sports Medicine*, 2(3), 160–165. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1034604>
- Steinacker, J. M., Lormes, W., Lehmann, M., & Altenburg, D. (1998). Training of rowers before world championships. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30(7), 1158–1163.
- Stöggl, T., & Sperlich, B. (2014). Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Frontiers in Physiology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00033>
- Stöggl, T., & Sperlich, B. (2015). The training intensity distribution among well-trained and elite endurance athletes. *Frontiers in Physiology*, 6, 295. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00295>
- Støren, Ø., Bratland-Sanda, S., Haave, M., & Helgerud, J. (2012). Improved VO₂max and time trial performance with more high aerobic intensity interval training and reduced training volume: A case study on an elite national cyclist. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(10), 2705–2711. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318241deec>
- Sylta, Ø., Tønnessen, E., & Seiler, S. (2014). From Heart-Rate Data to Training Quantification: A Comparison of 3 Methods of Training-Intensity Analysis. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(1), 100–107. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2013-0298>
- Terblanche, E., Kroff, J., Prins, L., & Stahn, A. (2005). Predictors of kayak endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37, S80. <https://doi.org/10.1249/00005768-200505001-00441>
- Tjelta, L. I. (2013). A longitudinal case study of the training of the 2012 European 1500m track champion. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 25(1), 11–18.
- Tønnessen, E., Sylta, Ø., Haugen, T. A., Hem, E., Svendsen, I. S., & Seiler, S. (2014). The Road to Gold: Training and Peaking Characteristics in the Year Prior to a Gold Medal Endurance Performance. *PLOS ONE*, 9(7), e101796. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101796>
- Torvik, P.-Ø., Solli, G. S., & Sandbakk, Ø. (2021). The Training Characteristics of World-Class Male Long-Distance Cross-Country Skiers. *Frontiers in Sports and Active Living*, 3. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.641389>
- Treff, G., Winkert, K., Sareban, M., Steinacker, J. M., Becker, M., & Sperlich, B. (2017). Eleven-Week Preparation Involving Polarized Intensity Distribution Is Not Superior to Pyramidal Distribution in

- National Elite Rowers. *Frontiers in Physiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00515>
- Treff, G., Winkert, K., Sareban, M., Steinacker, J. M., & Sperlich, B. (2019). The Polarization-Index: A Simple Calculation to Distinguish Polarized From Non-polarized Training Intensity Distributions. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00707>
- Ualí, I., Herrero, A. J., Garatachea, N., Marín, P. J., Alvear-Ordenes, I., & García-López, D. (2012). Maximal Strength on Different Resistance Training Rowing Exercises Predicts Start Phase Performance in Elite Kayakers. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(4), 941–946. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31822e58f8>
- Urhausen, A., Coen, B., Weiler, B., & Kindermann, W. (1993). Individual Anaerobic Threshold and Maximum Lactate Steady State. *International Journal of Sports Medicine*, 14(03), 134–139. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021157>
- van Hall, G., Jensen-Urstad, M., Rosdahl, H., Holmberg, H.-C., Saltin, B., & Calbet, J. a. L. (2003). Leg and arm lactate and substrate kinetics during exercise. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 284(1), E193–E205. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00273.2002>
- van Someren, K. A., & Howatson, G. (2008). Prediction of flatwater kayaking performance. *International journal of sports physiology and performance*, 3(2), 207–218.
- van Someren, K. A., & Oliver, J. E. (2002). The efficacy of ergometry determined heart rates for flatwater kayak training. *International Journal of Sports Medicine*, 23(1), 28–32. <https://doi.org/10.1055/s-2002-19268>
- van Someren, K. A., & Palmer, G. S. (2003). Prediction of 200-m sprint kayaking performance. *Canadian journal of applied physiology*, 28(4), 505–517.
- Verchoshanskij, J. V. (1990). Einige Gesetzmäßigkeiten der langfristigen Adaptation des Organismus von Sportlern an körperliche Belastungen. *Leistungssport*, 20(3), 10–13.
- Villarino-Cabezas, S., Gonzalez-Rave, J. M., Santos-Garcia, D. J., & Valdivielso, F. N. (2013). Comparison between a laboratory test in kayak-ergometer and continuous and interval exercises on open water in well-trained young kayakers. *International SportMed Journal*, 14(4), 196–204.
- Vogt, S., Heinrich, L., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H.-H., & Schmid, A. (2006). Power Output during Stage Racing in Professional Road Cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(1), 147–151. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000183196.63081.6a>
- Wasserman, K., & McIlroy, M. B. (1964). Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *American Journal of Cardiology*, 14(6), 844–852. [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(64\)90012-8](https://doi.org/10.1016/0002-9149(64)90012-8)
- Watson, A. M. (2017). Sleep and Athletic Performance. *Current Sports Medicine Reports*, 16(6), 413–418. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000418>
- Weineck, J. (2009). *Optimales Training* (16., durchgesehene Auflage). Spitta.
- Winchcombe, C. E., Binnie, M. J., Doyle, M. M., Hogan, C., & Peeling, P. (2019). Development of an on-water graded exercise test for flat-water sprint kayak athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–21. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0717>
- Zaciorskij, V. M. (1971). Kybernetik-Mathematik-Sport. *Theorie und Praxis der Körperkultur*, 20(10), 1068–1069.
- Zamparo, P., Capelli, C., & Guerrini, G. (1999). Energetics of kayaking at submaximal and maximal

- speeds. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 80(6), 542–548.
<https://doi.org/10.1007/s004210050632>
- Zapico, A. G., Calderón, F. J., Benito, P. J., González, C. B., Parisi, A., Pigozzi, F., & Di Salvo, V. (2007). Evolution of physiological and haematological parameters with training load in elite male road cyclists: A longitudinal study. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 47(2), 191–196.
- Zeller, S., Abel, T., & Strueder, H. K. (2017). Monitoring Training Load in Handcycling: A Case Study. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(11), 3094–3100.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001786>
- Zeppenfeld, B. (2021, Juli). *Sportler mit den meisten Goldmedaillengewinnen bei den Olympischen Sommerspielen im Zeitraum von 1896 bis 2021*. Statista.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1534/umfrage/anzahl-der-meisten-olympiasiege-sommer/>
- Zinner, C., Matzka, M., Leppich, R., Kounev, S., Holmberg, H.-C., & Sperlich, B. (2020). The Impact of the German Strategy for Containment of Coronavirus SARS-CoV-2 on Training Characteristics, Physical Activity and Sleep of Highly Trained Kayakers and Canoeists: A Retrospective Observational Study. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2.
<https://doi.org/10.3389/fspor.2020.579830>
- Zinner, C., Morales-Alamo, D., Ørtenblad, N., Larsen, F. J., Schiffer, T. A., Willis, S. J., Gelabert-Rebato, M., Perez-Valera, M., Boushel, R., Calbet, J. A. L., & Holmberg, H.-C. (2016). The Physiological Mechanisms of Performance Enhancement with Sprint Interval Training Differ between the Upper and Lower Extremities in Humans. *Frontiers in Physiology*, 7, 426.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00426>
- Zinner, C., Schäfer Olstad, D., & Sperlich, B. (2018). Mesocycles with different training intensity distribution in recreational runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 50(8), 1641–1648. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001599>
- Zouhal, H., Lahaye, S. L. D., Abderrahaman, A. B., Minter, G., Herbez, R., & Castagna, C. (2012). Energy system contribution to Olympic distances in flat water kayaking (500 and 1,000 m) in highly trained subjects. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(3), 825–831.

IV. Methodenverzeichnis

Im Folgenden werden die in Studie 1, 2 und 3 verwendeten Materialien und Messinstrumente spezifiziert und in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt:

Material und Messmethodik	Parameter [Messgröße]	Geräte-spezifikation	Hersteller
Amperometrie	Laktatkonzentration im kapillaren Vollblut [mmol·l ⁻¹]	Lactate Pro 2	Arkray KDK; Kyoto; Japan
Global Positioning System	- Geschwindigkeitsmessung [m·s ⁻¹] - Distanzmessung [m]	- Polar V 800 - Polar M430	Polar Electro Oy; Kempele; Finnland
Herzfrequenzmessung	Herzfrequenz [bpm]	- Polar V 800 - Polar M430	Polar Electro Oy; Kempele; Finnland
Nahinfrarot-spektroskopie	- Muskeloxygenierung (Tissue saturation index) [%] - Oxyhemoglobin [μM·cm] - Deoxyhemoglobin [μM·cm] - Blutvolumen (Total hemoglobin) [μM·cm]	Portamon	Artinis Medical System, Zetten ; Niederlande
	am: - <i>M. biceps brachii</i> - <i>M. vastus lateralis</i>		

Material und Messmethodik	Parameter [Messgröße]	Geräte- spezifikation	Hersteller
Paddelleistung (Ergometer)	- Distanz [m] - Zeit [s] - Leistung [W]	- Dansprint Kajakergometer - Dansprint PRO touch computer	Dansprint ApS, Hvidovre; Dänemark
Paddelleistung (Wasser)	- Distanz [m] - Zeit [s]	Rennkajak; Rennkanadier	- Nelo, Portugal - Plastex, Polen
Spirometrie	- Sauerstoffaufnahme [ml·min ⁻¹] - Atemminutenvolumen [ml·min ⁻¹] - Energieverbrauch [kcal·h ⁻¹] - Respiratorischer Quotient [dimensionslos]		Cortex, Leipzig; Deutschland
Subjektives Belastungs- empfinden	- Borg Skala (6-20)		Borg G. [1970]. Scand J Rehabil Med, 2[2], 92-98.

V. Gesamttexte der Studien

a. Studie 1

Accepted author manuscript version reprinted, by permission, from Int J Sports Physiol Perform. 2021 Feb 24;16(7):958-964. doi: 10.1123/ijsp.2019-0912. © Human Kinetics, Inc.

Matzka M, Zinner C, Kunz P, Holmberg HC, Sperlich B. Comparison of Physiological Parameters During On-Water and Ergometer Kayaking and Their Relationship to Performance in Sprint Kayak Competitions.

1 **Comparison of physiological parameters during on-water and ergometer**
2 **kayaking and their relationship to performance in sprint kayak competitions**

3
4
5 **Authors:** *Manuel Matzka¹, Christoph Zinner², Philipp Kunz³, Hans-Christer*
6 *Holmberg^{4,5}, Billy Sperlich³*

7
8 ¹ Applied Sports Science, University of Applied Sciences Hamm-Lippstadt, Hamm,
9 Germany

10 ² Department of Sport, University of Applied Sciences for Police and Administration
11 of Hesse, Wiesbaden, Germany

12 ³ Integrative and Experimental Exercise Science and Training, University of
13 Würzburg, Würzburg, Germany

14 ⁴ Swedish Winter Sports Research Centre, Department of Health Sciences, Mid
15 Sweden University, Östersund, Sweden

16 ⁵ Biomechanics Laboratory, Beijing Sport University, Beijing, China

17
18
19

20 **Abstract**

21

22 **Purpose:** This study was designed to i) compare various physiological indicators of
23 performance during a 5 x 1500-m incremental kayak test performed on an ergometer
24 and on-water and ii) analyze the relationships between these indicators and the actual
25 competition performance of elite sprint kayakers, aiming to provide information to
26 coaches for evaluating and planning training on-water.

27

28 **Methods:** Fourteen male and female German elite sprint kayakers performed an
29 incremental test both on an ergometer and on-water. The tissue saturation index of the
30 *m. biceps brachii* (TSI_{bb}), oxygen consumption (VO₂), ratings of perceived exertion
31 (RPE) and levels of blood lactate were measured and compared to actual racing times.
32 In addition, power output (PO) was monitored during ergometer testing only.

33

34 **Results:** VO₂ during the 4th (p=0.02; d=0.32) and final (fifth) (p<0.001; d=0.32) steps
35 of incremental testing was higher on-water than on the ergometer. The TSI_{bb} was
36 approximately 21% higher at the end of the ergometer test (p=0.002; d=1.14). During
37 the second (p=0.01; d=0.78), third (p=0.005; d=0.93) and fourth stages (p=0.005;
38 d=1.02), the RPE for ergometer kayaking was higher. During the final step, PO was
39 most closely correlated to 200-m (r=0.88), 500-m (r=0.93) and 1000-m (r=0.86) racing
40 times (all p<0.01).

41

42 **Conclusions:** During high-intensity kayaking on an ergometer or on-water, the VO₂
43 and TSI_{bb} differ. Furthermore, at moderate to submaximal intensities, the RPE was
44 higher for ergometer than for on-water kayaking. Finally, of all parameters assessed,
45 the PO during ergometer kayaking exhibited the strongest correlation with actual
46 racing performance.

47

48 **Keywords:** ergometry, muscle deoxygenation, near-infrared spectroscopy, VO₂peak,
49 water sport

50

51

52 Introduction

53

54 Race times during individual elite sprint kayaking competitions vary from 35-40 s for
55 the 200-m, 1:35-1:50 min for the 500-m and 3:30-3:50 min for the 1000-m event.^{1,2}
56 Over such distances, aerobic pathways supply approximately 37-40%, 62%-78% and
57 82-87% of the total energy produced, respectively.¹⁻³ Clearly, effective aerobic
58 performance is crucial to success in kayak sprinting^{1,2} and, in fact, the maximal oxygen
59 consumption (VO₂max) during ergometer kayaking and 200- and 1000-m on-water
60 time-trial performances of well-trained junior kayakers have been shown to be strongly
61 correlated ($r = 0.86$ and 0.9 , respectively).⁴ Recently, changes in muscle peripheral
62 oxygenation (measured by near-infrared-spectroscopy, NIRS) of the *Mm. latissimus*
63 *dorsi*, *biceps brachii* and *vastus lateralis* of high-level kayakers and canoeists assessed
64 during ergometer incremental testing were found to be even stronger predictors of on-
65 water time-trial performance than VO₂max, independent of distance.⁵ Previous
66 analysis has also revealed that power output at the lactate threshold measured during
67 kayak ergometer incremental testing strongly correlates with on-water kayaking time-
68 trial performance.^{4,6} Comprehensive testing of the VO₂max, oxygenation of muscles
69 involved and anaerobic threshold of sprint kayakers should aid in monitoring the
70 development of performance and adjusting training appropriately. To assess these
71 physiological and other performance parameters⁴⁻¹² as well as to prescribe training
72 intensity^{9,13-15} different incremental on-water and ergometer testing protocols are
73 applied in canoeing and kayaking. The physiological responses (i.e. oxygen uptake,
74 peripheral oxygenation, blood lactate) between ergometer and on-water testing in
75 relation to actual competitive performance in elite kayakers are unknown.

76

77 During on-water incremental testing in canoeing and kayaking, a variety of
78 environmental factors such as temperature, wind, waves and rain often prevent valid
79 and reliable test results, rendering testing with, e.g., kayak ergometers to i) overcome
80 the influence of environmental factors and ii) ensure quality of data. However, the
81 results of testing on a kayak ergometer are only of practical use if they accurately
82 reflect the results of the same test performed on-water under optimal conditions.
83 Several investigations compared on-water and ergometer kayaking revealing similar
84 oxygen uptake, blood lactate, heart rate and ratings of perceived exertion between on-
85 water and dry-land incremental testing.^{7,12,16} In contrast, other findings demonstrated
86 substantial differences between kayaking on an ergometer and on-water (when
87 comparing 1- to 3-min exercise bouts at heart and stroke rates equivalent to 85%
88 VO₂peak) with respect to certain aspects of technique and muscle recruitment, due to
89 recoil of the ropes attached to the shaft of the ergometer.^{17,18} Another investigation
90 reported significantly lower levels of blood lactate during on-water training at
91 velocities corresponding to concentrations of 2.5 and 5.0 mmol·L⁻¹ during incremental
92 ergometer testing.¹⁹ Furthermore, the examination of a 120-s maximal sprint on a
93 kayak ergometer, aiming to resemble the duration and physiological demands of the
94 500-m race distance, found that peak levels of blood lactate, as well as the average
95 stroke rate during the ergometer trials differed from those during a 500-m kayak sprint
96 on water.²⁰

97

98 In summary, i) the physiological responses to kayaking on an ergometer and on-water
99 demonstrate conflicting results; ii) so far no study assessed oxygen uptake, peripheral
100 oxygenation, blood lactate and heart rate in direct on-water and ergometer comparison
101 and iii) the physiological responses (i.e. oxygen uptake, peripheral oxygenation, blood
102 lactate) between ergometer and on-water testing in relation to actual competitive

103 performance in elite kayakers are unknown. Therefore, the aim of the present
104 investigation was twofold: i) to compare various important physiological indicators of
105 performance during incremental testing on an ergometer and on water and ii) to
106 examine the relationship of these indicators to actual competitive performances of elite
107 sprint kayakers.
108

109 **Methods**

110 *Participants*

111 The key anthropometric, physiological and performance characteristics of the 14
112 highly trained male (n = 8) and female (n = 6) flatwater sprint kayakers who
113 participated are summarized in Table 1.

114 ****** Table 1 near here******

115 Seven of these participants were members of the German National Team, three of the
116 German Development Team and four of the Western Regional Team with all
117 participants competing on the highest national level in Germany. The average official
118 competition times obtained one to two weeks before testing are summarized in table
119 1. All were familiar with all the testing procedures employed, having undergone
120 frequent testing throughout their career. All procedures were approved by the
121 institute's ethics committee and conducted in accordance with the Declaration of
122 Helsinki. After being informed in detail about the risks, benefits and procedures, all
123 participants and their legal guardians gave their written consent to participate in this
124 study.

125 *Experimental Design*

126 All on-water testing took place on the regatta course in Duisburg-Wedau (Germany),
127 the venue for several international canoe sprint championships, as well as the World
128 Cup series of the International Canoe Federation (ICF). To assess relationships
129 between the physiological variables measured during the incremental tests and
130 performance during competition, all testing was scheduled one to two weeks after the
131 Western Regional Championships or the German National Championships. All
132 kayakers competed in the 200- and 500-m races and some (7 men and 4 women) also
133 competed in the 1000-m event.

134 On two separate days in randomized order, each participant performed two
135 incremental tests, one on-water in his/her own kayak and the other on a kayak
136 ergometer [Dansprint Ergometer, Dansprint ApS, Denmark]. Testing sessions were
137 scheduled 24 h apart to allow adequate recovery and were completed at approximately
138 the same time of the day to minimize the influence of diurnal fluctuations. The
139 participants were asked to refrain from all physical exercise for 12 h and from drinking
140 alcohol for 48 h prior to the experimental sessions, as well as to maintain their regular
141 diet. In addition, athletes were instructed to avoid food intake 2h prior to testing and
142 were requested to arrive in a well hydrated state. Their diet and state of hydration were
143 assessed with pre-test questionnaires.

144

145 *Methodology*

146 *The incremental test*

147 The incremental test protocol involved 5 x 1500-m trials on both the ergometer and
148 on-water at different intensities (i.e., 60%, 70%, 80%, and 90% of maximal heart rate,
149 as well as an all-out effort). In order to test the elite athletes, we had to adhere to this
150 standard protocol utilized by the Canoe Federation for performance testing which is
151 frequently employed for comparing inter- and intraindividual physiological
152 adaptation. As all our athletes were members of the Canoe Federation, they were
153 highly experienced in performing this type of protocol and their experience was
154 important for maximizing the reliability and validity of the results obtained.

155 In two previous investigations involving incremental step testing of kayakers (albeit
156 employing a protocol slightly different from our own with respect to the number,
157 duration and intensity of increments), the reliability and validity of measurements of
158 heart rate, VO₂, blood lactate and stroke rate were acceptable to excellent.^{7,12}

159 The heart rates utilized here were based on the maximal heart rates obtained four to
160 six weeks before with the same incremental on-water test protocol by the Western
161 German Canoe Federation. The 30-45 s interval between successive steps was the time
162 required to sample capillary blood from the earlobe. All participants received
163 continuous visual feedback from a heart rate monitor (Polar Wear Link System and
164 Polar V800 Heart Rate Monitor, Polar Electro OY, Kempele, Finland) mounted
165 directly in front of them on the boat or ergometer and averaged every second. During
166 each stage the stroke-rate was self-selected. The ergometer was calibrated prior to each
167 test in accordance with the manufacturer's recommendations.

168 Capillary blood was sampled from the right earlobe for analysis of lactate (Lactate Pro
169 2, Arkray KDK, Kyoto, Japan), at baseline and after each step. At these same time-
170 points, rating of perceived exertion (RPE) was assessed employing the 6-20-point
171 Borg scale.²¹

172 Oxygen uptake was monitored continuously with an open-circuit breath-by-breath
173 analyzer (MetaMax 3B, Cortex Biophysik, Leipzig, Germany), employing standard
174 algorithms to compensate for the time delay between gas consumption and the signal.
175 This analyzer was calibrated prior to each test with both 15.8% and 5% O₂ in N₂
176 (Praxair, Düsseldorf, Germany), i.e., concentrations that cover the range of the
177 expected fractional concentration of O₂. The volume sensor was calibrated with a
178 precision 3-L syringe (Cortex Biophysik, Leipzig, Germany). Average respiratory
179 values were calculated for the last 120 s of each individual increment. The highest 30-
180 s VO₂ during the test was considered to be VO_{2peak}.

181 During all testing, tissue levels of oxy-[HbO₂] and deoxy-[HHb] hemoglobin were
182 monitored with a portable near-infrared spectrophotometer (NIRS; wavelengths: 760–
183 840 nm; Portamon, Artinis Medical Systems, Zetten, the Netherlands) attached with a
184 10 × 10-cm adhesive patch across the *m. biceps brachii* of the right arm and covered
185 with a dark bandage to keep out ambient light. A marker on the skin allowed accurate
186 repositioning of the sensor for each subsequent trial. The tissue saturation index (TSI,
187 calculated as $[\text{HbO}_2]/([\text{HbO}_2] + [\text{HHb}]) \times 100$ and expressed as %), which reflects
188 muscle oxygenation more accurately than [HHb],²² indicated the balance between
189 oxygen supply and consumption.

190 In addition, heart rate was monitored continuously by telemetry during all testing
191 (Polar Wear Link System and Polar V800 Heart Rate Monitor, Polar Electro Oy,
192 Kempele, Finland) and averaged every 1-s. The highest value during incremental tests
193 both on the ergometer and on-water was considered to be peak heart rate.

194 Power output during the ergometer test was recorded using the Dansprint PRO touch
195 computer (Dansprint ApS, Denmark). In addition, the power outputs associated with
196 blood lactate concentrations of 2 and 3 mmol·L⁻¹ were determined by linear
197 interpolation between the two closest points, as in previous studies.²³ The 3 mmol·L⁻¹
198 value was chosen as proxy for anaerobic threshold since four participants did not
199 exceed 4 mmol·L⁻¹ and it has been shown that the anaerobic threshold for kayakers
200 varies between 3 and 4 mmol·L⁻¹.²⁴

201

202 **Statistical analysis**

203 Statistical analyses were carried out with the Statistica software package for
204 Windows® (version 7.1, StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA). Testing revealed that all data
205 were distributed normally, making transformation unnecessary. A repeated-measures
206 ANOVA was applied to compare responses in each variable across each step of the
207 incremental tests on the ergometer and on-water. When a global difference over time
208 was determined, Tukey post hoc analysis was used to identify where changes occurred.
209 Statistical significance was defined as $p \leq 0.05$. Effect sizes were calculated as Cohen's
210 d values,²⁵ where 0.0-0.41 represents a small, 0.41-0.70 a moderate and ≥ 0.70 a large
211 effect. In addition, 95% confidence intervals for Cohen's d were calculated.²⁶ The
212 correlation between the various measured physiological and performance parameters
213 and competition times from the three competition distances were calculated using
214 Pearson's correlation coefficient. The descriptors for correlation values were as
215 follows; $r < 0.1$ – very small, $0.1 \leq r < 0.3$ – small, $0.3 \leq r < 0.5$ – moderate, $0.5 \leq r <$
216 0.7 – large, $0.7 \leq r < 0.9$ – very large, $r \geq 0.9$ – nearly perfect.²⁷

217

218 **Results**

219 Table 2 summarizes all performance and physiological variables during each stage of
220 the incremental tests. VO_2 was higher during the 4th ($p = 0.02$; $d = 0.32$) and final ($p <$
221 0.001 ; $d = 0.32$) increments on-water than during ergometer testing. The TSI of the m.
222 *biceps brachii* was approximately 21% higher at the end of the ergometer test ($p =$
223 0.002 ; $d = 0.90$) than on-water. During the second ($p = 0.01$; $d = 0.78$), third ($p = 0.005$;
224 $d = 0.91$) and fourth ($p = 0.005$; $d = 1.01$) incremental steps ratings of perceived
225 exertion were higher for ergometer kayaking, with no difference in the case of the first
226 ($p = 0.15$; $d = 0.88$) and final ($p = 0.98$; $d = 0.53$). Moreover, there were no differences
227 between the two conditions with respect to blood levels of lactate, the respiratory
228 exchange ratio, ventilation or respiratory frequency.

229 The relationships between certain physiological parameters of performance and racing
230 times are documented in Table 3. The correlation between the average power output
231 during the final step of incremental testing on the ergometer and all competitive
232 performances was very large to almost perfect (200-m: $r = 0.88$; $p < 0.001$, 500-m: $r =$
233 0.93 ; $p < 0.001$, 1000-m: $r = 0.86$; $p < 0.001$).

234 Furthermore, the $\text{VO}_{2\text{peak}}$ values obtained during both on-water and ergometer testing
235 demonstrated very large correlations with performance on all distances ($r > 0.76$; $p \leq$
236 0.01 in all cases), as did power output at a blood lactate concentration of 2 and 3
237 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($r > 0.73$; $p \leq 0.01$ in all cases). Finally, the TSI of the m. *biceps brachii*
238 during the last step of incremental ergometer testing exhibited a large correlation with
239 1000-m race performance ($r = 0.62$; $p = 0.04$).

240

241 ****** Tables 2 and 3 near here ******

242

243 **Discussion**

244 The current study was designed to i) compare the VO₂peak, lactate threshold and
245 muscle oxygenation obtained during incremental kayaking on an ergometer and on-
246 water and ii) analyze relationships between these indicators of performance and the
247 actual performance of elite kayakers during competitions.

248 The major findings were as follows:

- 249 (i) The VO₂peak on-water was higher than during ergometer testing.
- 250 (ii) The RPE was higher during submaximal kayaking on the ergometer than on-
251 water.
- 252 (iii) The TSI of the *m. biceps brachii* during the final step of incremental testing
253 was lower on the ergometer than on-water.
- 254 (iv) The VO₂peak both on-water and on the ergometer, as well as the power at
255 blood lactate concentrations of 2 and 3 mmol·L⁻¹ and maximal power on the
256 ergometer were correlated with actual racing performance.

257 *Differences between testing on the ergometer and on-water*

258 In the present investigation the VO₂peak during on-water kayaking was approximately
259 8% higher than on the ergometer. While in the current investigation VO₂peak differed,
260 two previous studies observed no difference in ergometer and on-water VO₂ and
261 VO₂peak.^{12,28} This discrepancy may result from different test protocols, involving
262 either a 4-min incremental test with assessment of intensity on the basis of power¹² or
263 a 4-min all-out time trial.²⁸ Unfortunately, both of these studies employed different
264 devices to measure oxygen uptake, which prevents more detailed comparison.

265 In the present study the higher on-water VO₂peak may result from different muscle
266 activation patterns compared to ergometer testing. Although muscle activation during
267 the incremental testing was not assessed, it is well known that for maintaining stability
268 the activities of leg and pelvis muscles during on-water kayaking increase with
269 intensity,²⁹ explaining the difference in oxygen demand during on-water versus
270 ergometer kayaking. Another explanation for the lower VO₂peak values on the
271 ergometer compared to on-water testing may result from the individual testing
272 preference of our athletes. In our and the experience of the coaches, elite kayakers
273 generally prefer field over laboratory testing and during tests to volitional exhaustion
274 less motivated individuals may stop exercising before their VO₂peak is reached.³⁰
275 Although we did not assess the motivational state, such a conclusion is not supported
276 by the ratings of perceived exertion, which were the same during the final stage of the
277 incremental testing on the ergometer and on-water. Finally, we cannot exclude that
278 differences in VO₂max may have occurred because of influential external factors (i.e.
279 laboratory vs. field test; sensor calibration, humidity, wind etc.).

280 The RPE on the ergometer was higher during the second, third and fourth incremental
281 steps than on-water, which is in agreement with earlier reports.^{9,12} Winchcombe and
282 colleagues attribute this difference to the more pronounced activation of the anterior
283 deltoid muscle on a kayak-ergometer, resulting from the recoil of the rope attached to
284 the flywheel during the recovery phase, as well as the greater difficulties involved in
285 obtaining lower intensities.¹² However, our own experience, as well as feedback from
286 the kayakers, indicate that the higher perceived exertion during ergometer kayaking
287 may simply reflect the lack of a proper gliding phase together with softer initiation of

288 the pull during strokes at lower rates, leading to earlier attainment of peak force during
289 the catch-phase of the stroke.¹⁸ Such earlier peak force production presumably causes
290 the paddle stroke to be perceived as “harder” at submaximal intensities only, since at
291 all-out intensity, with maximal stroke rates, the lack of a gliding phase becomes less
292 obvious; while at the lowest intensities (i.e. 1st incremental step) the force exerted was
293 so low that the athletes felt no difference.

294 In the present study, the TSI during the all-out incremental phase indicated that muscle
295 oxygenation was 21% lower during on-water than ergometer kayaking. Previous
296 research has highlighted the fact that the TSI is correlated with muscle activity and can
297 serve as a measure of muscular fatigue.³¹ Our observations are in agreement with other
298 findings of more pronounced activity of the m. *triceps brachii* and m. *latissimus dorsi*
299 during kayaking on-water than on an ergometer, as well as greater elbow flexion during
300 high- than low-intensity ergometer kayaking.²⁹ The exact reason for this latter
301 difference remains unknown, although previous research suggests that recoil forces
302 acting on the shaft during ergometer kayaking may force athletes to recruit the m.
303 *biceps brachii* to a greater extent.¹⁸ Accordingly, regular practice on an ergometer may
304 influence both patterns of muscle recruitment and overall technique in an inappropriate
305 manner and should thus be utilized only with caution.

306 *Correlations between incremental testing and performance during competition*

307 Of the parameters assessed here, the average power output during the all-out stage of
308 incremental testing on the ergometer was most closely correlated with racing
309 performance. This correlation ranged from very strong (with the 200-m and 1000-m
310 races) to almost perfect (500-m). These results are consistent with other research
311 designed to predict sprint kayaking performance, which in general reveals that various
312 measures of power (e.g., maximal aerobic power, power at the lactate threshold, work
313 performed during the 30-s Wingate test, work performed during a 2-min all-out trial)
314 correlate strongly with performance.^{10,11,32} For example, the work completed during 2-
315 min and 30-s all-out trials on a kayak ergometer and competitive 1000-m, 500-m, 200-
316 m performance are large to very large.¹⁰

317 Since sprint kayaking poses high demands on endurance^{1,2} and strength^{10,11,33–35}
318 proficiencies, it is not surprising that the ability to produce high average power outputs
319 over a certain distance or period of time correlates closely with performance. In this
320 connection, a previous report highlighted that a 1% increase in power output elevates
321 kayak speed by approximately 0.33%.³⁶ However, when interpreting our present
322 findings, it is important to remember that with kayaking on an ergometer, power output
323 is measured on the basis of the angular velocity of the flywheel, which is created by
324 the ropes attached to the shaft.³⁷ Thus, this measurement provides no information
325 about whether the force was generated with a skillful and economical technique.
326 Therefore, the very strong (to almost perfect) correlation between average power
327 output during the all-out stage on the ergometer and racing performance must be
328 interpreted with caution: during on-water kayaking optimizing use of the wing blade
329 to propel the boat as efficiently as possible is crucial.³⁸ Accordingly, when attempting
330 to evaluate on-water performance on the basis of power output during an incremental
331 test on a kayak ergometer, the technical skill-level of the athlete must also be taken
332 into account.

333 **Practical applications**

334 While ergometer kayaking is useful for training during cold and/or stormy weather as
335 well as in icy conditions and, moreover, often employed to assess performance, our
336 current results indicate that VO_2 during high-intensity bouts on the ergometer is
337 significantly lower than on-water. These findings indicate that coaches and athletes
338 should carefully apply ergometer derived VO_2 to e.g. define intensity zones for
339 training prescription. In addition, the differences in muscle oxygenation of our study
340 indicate different involvement of the m. *biceps brachii* during high-intensity kayaking
341 on an ergometer and on-water. Therefore, kayaking on an ergometer may not mimic
342 kayaking on-water accurately and (depending on the environmental conditions) should
343 be cautiously applied for training and testing.

344 **Conclusion**

345 During high-intensity kayaking on an ergometer or on-water, the VO_2 and TSI of the
346 m. *biceps brachii* differ. Furthermore, at moderate to submaximal intensities the RPE
347 was higher for ergometer kayaking. In addition, of all the parameters assessed here,
348 the power output during ergometer kayaking exhibited the strongest correlation with
349 actual racing performance. These findings suggest that ergometer kayaking predicts
350 racing performance but may not mimic kayaking on-water accurately and coaches and
351 athletes should carefully apply ergometer testing for training prescription.

352 **Acknowledgements**

354 The authors would like to thank all the athletes and coaches for their cooperation and
355 for the time they dedicated to this study. The project was supported financially by the
356 German Federal Institute of Sports Sciences.

357

358 **References**

- 359 1. Zamparo P, Capelli C, Guerrini G. Energetics of kayaking at submaximal and
360 maximal speeds. *Eur J Appl Physiol.* 1999;80(6):542-548.
361 doi:10.1007/s004210050632
- 362 2. Zouhal H, Lahaye SLD, Abderrahaman AB, Minter G, Herbez R, Castagna C.
363 Energy system contribution to Olympic distances in flat water kayaking (500
364 and 1,000 m) in highly trained subjects. *J Strength Cond Res.* 2012;26(3):825–
365 831.
- 366 3. Byrnes WC, Kearney JT. Aerobic and anaerobic contributions during simulated
367 canoe/kayak sprint events. *Med Amp Sci Sports Amp Exerc.*
368 1997;29(Supplement):220.
- 369 4. Borges TO, Dascombe B, Bullock N, Coutts AJ. Physiological characteristics of
370 well-trained junior sprint kayak athletes. *Int J Sports Physiol Perform.*
371 2015;10(5):593-599. doi:10.1123/ijsp.2014-0292
- 372 5. Paquette M, Bieuzen F, Billaut F. Muscle oxygenation rather than VO_2max as a
373 strong predictor of performance in sprint canoe-kayak. *Int J Sports Physiol*
374 *Perform.* Published online November 19, 2018:1-9. doi:10.1123/ijsp.2018-
375 0077
- 376 6. Bishop D. Physiological predictors of flat-water kayak performance in women.
377 *Eur J Appl Physiol.* 2000;82(1-2):91-97.
- 378 7. Carrasco Páez L, Martínez Díaz IC, Hoyo Lora M del, Sañudo Corrales F de B,

- 379 Ochiana N. Ergometric testing for top-level kayakers: validity and reliability of
380 a discontinuous graded exercise test. *Kinesiol Slov* 16. Published online 2010.
- 381 8. Fry RW, Morton AR. Physiological and kinanthropometric attributes of elite
382 flatwater kayakists. *Med Sci Sports Exerc.* 1991;23(11):1297-1301.
- 383 9. van Someren KA, Oliver JE. The efficacy of ergometry determined heart rates
384 for flatwater kayak training. *Int J Sports Med.* 2002;23(1):28-32. doi:10.1055/s-
385 2002-19268
- 386 10. van Someren KA, Howatson G. Prediction of flatwater kayaking performance.
387 *Int J Sports Physiol Perform.* 2008;3(2):207-218.
- 388 11. van Someren KA, Palmer GS. Prediction of 200-m sprint kayaking
389 performance. *Can J Appl Physiol Rev Can Physiol Appl.* 2003;28(4):505-517.
- 390 12. Winchcombe CE, Binnie MJ, Doyle MM, Hogan C, Peeling P. Development of
391 an on-water graded exercise test for flat-water sprint kayak athletes. *Int J Sports*
392 *Physiol Perform.* Published online March 12, 2019:1-21.
393 doi:10.1123/ijsp.2018-0717
- 394 13. García-Pallarés J, García-Fernández M, Sánchez-Medina L, Izquierdo M.
395 Performance changes in world-class kayakers following two different training
396 periodization models. *Eur J Appl Physiol.* 2010;110(1):99-107.
- 397 14. García-Pallarés J, Sánchez-Medina L, Carrasco L, Díaz A, Izquierdo M.
398 Endurance and neuromuscular changes in world-class level kayakers during a
399 periodized training cycle. *Eur J Appl Physiol.* 2009;106(4):629-638.
- 400 15. Paquette M, Bieuzen F, Billaut F. Sustained muscle deoxygenation vs. sustained
401 high VO₂ during high-intensity interval training in sprint canoe-kayak. *Front*
402 *Sports Act Living.* 2019;1. doi:10.3389/fspor.2019.00006
- 403 16. Mitchell A. Comparison of cardiorespiratory responses to open-water and
404 simulated kayaking. *Biol Sport.* 1998;15(4):S. 229-236.
- 405 17. Fleming N, Donne B, Fletcher D. Effect of kayak ergometer elastic tension on
406 upper limb EMG activity and 3D kinematics. *J Sports Sci Med.* 2012;11(3):430-
407 437.
- 408 18. Fleming N, Donne B, Fletcher D, Mahony N. A biomechanical assessment of
409 ergometer task specificity in elite flatwater kayakers. *J Sports Sci Med.*
410 2012;11(1):16-25.
- 411 19. Villarino-Cabezas S, Gonzalez-Rave JM, Santos-Garcia DJ, Valdivielso FN.
412 Comparison between a laboratory test in kayak-ergometer and continuous and
413 interval exercises on open water in well-trained young kayakers. *Int SportMed J.*
414 2013;14(4):196-204.
- 415 20. Barnes CA, Adams PC. Reliability and criterion validity of a 120 s maximal
416 sprint on a kayak ergometer. *J Sport Sci.* 1998;16(1):25-26.
- 417 21. Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil*
418 *Med.* 1970;2(2):92-98.
- 419 22. Wolf M, Ferrari M, Quaresima V. Progress of near-infrared spectroscopy and
420 topography for brain and muscle clinical applications. *J Biomed Opt.*
421 2007;12(6):062104. doi:10.1117/1.2804899
- 422 23. Zinner C, Schäfer Olstad D, Sperlich B. Mesocycles with different training
423 intensity distribution in recreational runners. *Med Sci Sports Exerc.*
424 2018;50(8):1641-1648. doi:10.1249/MSS.0000000000001599
- 425 24. Dascombe B, Laursen P, Nosaka K, Polglaze T. No effect of upper body
426 compression garments in elite flat-water kayakers. *Eur J Sport Sci.*
427 2013;13(4):341-349. doi:10.1080/17461391.2011.606842
- 428 25. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences.* L. Erlbaum
429 Associates; 1988.

- 430 26. Hedges LV, Olkin I. *Statistical Methods for Meta-Analysis*. Academic press;
431 2014.
- 432 27. New View of Statistics: Effect Magnitudes. Accessed December 20, 2019.
433 <http://www.sportsci.org/resource/stats/effectmag.html>
- 434 28. van Someren KA, Phillips GR, Palmer GS. Comparison of physiological
435 responses to open water kayaking and kayak ergometry. *Int J Sports Med*.
436 2000;21(3):200-204.
- 437 29. Bjerkefors A, Tarassova O, Rosén JS, Zakaria P, Arndt A. Three-dimensional
438 kinematic analysis and power output of elite flat-water kayakers. *Sports*
439 *Biomech*. 2018;17(3):414-427. doi:10.1080/14763141.2017.1359330
- 440 30. Poole DC, Jones AM. Measurement of the maximum oxygen uptake $\dot{V}O_{2max}$:
441 $\dot{V}O_{2peak}$ is no longer acceptable. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985.
442 2017;122(4):997-1002. doi:10.1152/jappphysiol.01063.2016
- 443 31. Perrey S, Ferrari M. Muscle oximetry in sports science: a systematic review.
444 *Sports Med*. 2018;48(3):597-616. doi:10.1007/s40279-017-0820-1
- 445 32. Terblanche E, Kroff J, Prins L, Stahn A. Predictors of kayak endurance
446 performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37:S80. doi:10.1249/00005768-
447 200505001-00441
- 448 33. Ualí I, Herrero AJ, Garatachea N, Marín PJ, Alvear-Ordenes I, García-López D.
449 Maximal strength on different resistance training rowing exercises predicts start
450 phase performance in elite kayakers. *J Strength Cond Res*. 2012;26(4):941-946.
- 451 34. Santos JAR dos, Silva AV da. Correlation between strength and kayaking
452 performance in water. *J Sport Health Res*. 2010;2(2):6-.
- 453 35. McKean MR, Burkett BJ. The influence of upper-body strength on flat-water
454 sprint kayak performance in elite athletes. *Int J Sports Physiol Perform*.
455 2014;9(4):707-714.
- 456 36. Jackson PS. Performance prediction for Olympic kayaks. *J Sports Sci*.
457 1995;13(3):239-245. doi:10.1080/02640419508732233
- 458 37. Macdermid PW, Fink PW. The validation of a paddle power meter for slalom
459 kayaking. *Sports Med Int Open*. 2017;1(2):E50-E57. doi:10.1055/s-0043-
460 100380
- 461 38. Sanders R, Baker J. Evolution of technique in flatwater kayaking. In: *Science &*
462 *Practice of Canoe/Kayak High-Performance Training*. Elite Sport Department,
463 Wingate Institute for Physical Education and Sport; 1998:67-81.
- 464

Table 1. Anthropometric, physiological and performance characteristics of our kayakers.

Parameter	Condition	All (n = 14)	Women (n = 6)	Men (n = 8)
Age [yrs]		19.0 ± 3.6	17.8 ± 2.5	19.4 ± 4.4
Height [cm]		180 ± 10.4	170 ± 4.1	187 ± 7.1
Body mass [kg]		76.0 ± 12.1	65.8 ± 4.8	83.3 ± 10.3
Peak oxygen uptake [L·min ⁻¹]	On-water	4.0 ± 1.0	3.0 ± 0.1	4.5 ± 0.4
	Ergometer	3.6 ± 0.9	2.6 ± 0.2	3.9 ± 0.1
Peak oxygen uptake [ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹]	On-water	49.3 ± 7.6	43.6 ± 2.6	56.8 ± 3.7
	Ergometer	43.9 ± 7.6	38.6 ± 2.3	51.1 ± 5.5
200-m Racing Time [s]	On-water	41.6 ± 4.2	45.4 ± 2.6	38.8 ± 2.4
% of the world record		85.2 ± 5.0	83.8 ± 4.9	86.4 ± 5.2
500-m Racing Time [s]	On-water	112 ± 8.2	120 ± 3.9	107 ± 5.3
% of the world record		89.2 ± 3.7	89 ± 3.0	89.4 ± 4.4
1000-m Racing Time [s]	On-water	251 ± 25.3	273 ± 25.0	239 ± 16.1
% of the world record		(n = 11)	(n = 4)	(n = 7)
		84.9 ± 5.9	84.5 ± 7.1	85.1 ± 5.7

All values are means ± SD

Table 2. Physiological parameters of performance during each 1500-m stage of incremental testing on the ergometer and on-water

Parameter	Incr. step	Ergometer	On-water	P-value	Cohen's <i>d</i>	95% CI for Cohen's <i>d</i>
Time required to complete [s]	1	636 ± 84.2	562 ± 52.7	< 0.001	1.05	-1.84 - -0.25
	2	569 ± 54.3	526 ± 50.8	< 0.001	0.81	-1.57 - -0.03
	3	519 ± 43.8	486 ± 37.5	< 0.001	0.81	-1.57 - -0.03
	4	483 ± 38.6	452 ± 30.0	< 0.001	0.90	-1.67 - -0.11
	5	430 ± 41.2	401 ± 28.7	0.002	0.80	-1.56 - -0.02
Heart rate [beats·min ⁻¹]	1	120 ± 7	122 ± 6	1.00	0.29	-0.46 - 1.03
	2	134 ± 5	135 ± 6	1.00	0.20	-0.55 - 0.94
	3	152 ± 6	154 ± 8	1.00	0.27	-0.48 - 1.01
	4	172 ± 6	172 ± 7	1.00	0.14	-0.88 - 0.60
	5	193 ± 8	193 ± 5	1.00	0.14	-0.61 - 0.88
Oxygen uptake [mL·min ⁻¹]	1	1450 ± 335	1530 ± 463	0.95	0.19	-0.56 - 0.93
	2	1800 ± 357	1920 ± 543	0.55	0.26	-0.48 - 1.00
	3	2230 ± 514	2380 ± 630	0.24	0.26	-0.48 - 1.01
	4	2680 ± 555	2890 ± 739	0.02	0.32	-0.43 - 1.07
	5	3430 ± 856	3720 ± 975	< 0.001	0.32	-0.43 - 1.06
Tissue Saturation Index (TSI) [%] (n = 11)	At rest	69.6 ± 3.1	65.6 ± 4.6	0.81	1.00	-1.88 - -0.09
	1	67.2 ± 3.6	61.5 ± 5.7	0.12	1.19	-2.09 - -0.26
	2	66.5 ± 3.4	62.2 ± 6.6	0.61	0.77	-1.63 - 0.11
	3	63.1 ± 4.9	61.6 ± 6.8	1.00	0.27	-1.11 - 0.57
	4	60.8 ± 3.5	61.4 ± 6.6	1.00	0.02	-0.81 - 0.86
5	47.2 ± 13.2	59.9 ± 8.6	0.002	0.90	0.01 - 1.77	
Blood concentration of lactate [mmol·L ⁻¹]	1	1.1 ± 0.2	1.1 ± 0.1	1.00	0.27	-0.48 - 1.01
	2	1.1 ± 0.3	1.2 ± 0.2	1.00	0.26	-0.49 - 1.00
	3	1.4 ± 0.5	1.4 ± 0.3	1.00	0.03	-0.77 - 0.71
	4	2.2 ± 0.8	2.4 ± 1.1	1.00	0.14	-0.60 - 0.88
	5	7.0 ± 3.2	7.7 ± 3.5	0.07	0.23	-0.51 - 0.98
Borg 6-20-point ratings of perceived exertion [arbitrary units]	1	7.7 ± 1.2	6.8 ± 0.9	0.15	0.88	-1.65 - -0.09
	2	10.2 ± 1.4	8.9 ± 1.9	0.01	0.78	-1.54 - 0.00
	3	13.1 ± 1.4	11.7 ± 1.6	0.005	0.91	-1.68 - -0.12
	4	15.5 ± 1.6	14.1 ± 1.1	0.005	1.01	-1.79 - -0.21
	5	19.6 ± 0.5	19.2 ± 0.8	0.98	0.53	-1.28 - -0.23

All values are means ± SD

Table 3. Correlations between physiological and performance parameters and racing times.

Parameter	Value	200-m	500-m	1000-m
<i>Measured during ergometer testing</i>				
VO ₂ peak	r	0.83	0.85	0.76
	p	< 0.001	< 0.001	0.007
Relative VO ₂ peak	r	0.73	0.80	0.66
	p	0.003	< 0.001	0.03
TSI _{max}	r	0.44	0.44	0.62
	p	0.12	0.12	0.04
Power with a blood lactate concentration of 2 mmol·L ⁻¹	r	0.74	0.83	0.75
	p	0.002	< 0.001	0.01
Power with a blood lactate concentration of 3 mmol·L ⁻¹	r	0.73	0.82	0.76
	p	0.003	< 0.001	0.01
Average power (5th increment)	r	0.88	0.93	0.86
	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001
<i>Measured during on-water testing</i>				
VO ₂ peak	r	0.79	0.86	0.76
	p	0.001	< 0.001	0.01
Relative VO ₂ peak	r	0.68	0.65	0.66
	p	0.007	0.01	0.03
TSI _{max}	r	0.08	0.23	0.07
	p	0.83	0.72	0.85

TSI = Tissue Saturation Index, statistically significant correlations are highlighted in **bold text**

b. Studie 2

Matzka, M., Leppich, R., Holmberg, H. C., Sperlich, B., & Zinner, C. The relationship between the distribution of training intensity and performance of kayak and canoe sprinters: A retrospective observational analysis of one season of competition. *Frontiers in Sports and Active Living*, 371. 2022 Jan 5;3:788108. doi: 10.3389/fspor.2021.788108.



The Relationship Between the Distribution of Training Intensity and Performance of Kayak and Canoe Sprinters: A Retrospective Observational Analysis of One Season of Competition

Manuel Matzka^{1*}, Robert Leppich², Hans-Christer Holmberg³, Billy Sperlich^{1*} and Christoph Zinner⁴

¹ Integrative and Experimental Exercise Science and Training, University of Würzburg, Würzburg, Germany, ² Software Engineering Group, Department of Computer Science, University of Würzburg, Würzburg, Germany, ³ Department of Health Sciences, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, ⁴ Department of Sport, University of Applied Sciences for Police and Administration of Hesse, Wiesbaden, Germany

OPEN ACCESS

Edited by:

François Billaut,
Laval University, Canada

Reviewed by:

Leonardo Henrique Dalcheco
Messias,

Sao Francisco University, Brazil
Paul S. R. Goods,
Murdoch University, Australia

*Correspondence:

Manuel Matzka
matzka.manuel@gmail.com
Billy Sperlich
billy.sperlich@uni-wuerzburg.de

Specialty section:

This article was submitted to
Elite Sports and Performance
Enhancement,
a section of the journal
Frontiers in Sports and Active Living

Received: 01 October 2021

Accepted: 23 November 2021

Published: 05 January 2022

Citation:

Matzka M, Leppich R, Holmberg H-C,
Sperlich B and Zinner C (2022) The
Relationship Between the Distribution
of Training Intensity and Performance
of Kayak and Canoe Sprinters: A
Retrospective Observational Analysis
of One Season of Competition.
Front. Sports Act. Living 3:788108.
doi: 10.3389/fspor.2021.788108

Purpose: To evaluate retrospectively the training intensity distribution (TID) among highly trained canoe sprinters during a single season and to relate TID to changes in performance.

Methods: The heart rates during on-water training by 11 German sprint kayakers (7 women, 4 men) and one male canoeist were monitored during preparation periods (PP) 1 and 2, as well as during the period of competition (CP) (total monitoring period: 37 weeks). The zones of training intensity (Z) were defined as Z1 [$<80\%$ of peak oxygen consumption (VO_{2peak})], Z2 ($81-87\%$ VO_{2peak}) and Z3 ($>87\%$ VO_{2peak}), as determined by $4 \times 1,500$ -m incremental testing on-water. Prior to and after each period, the time required to complete the last 1,500-m stage (all-out) of the incremental test (1,500-m time-trial), velocities associated with 2 and 4 $mmol \cdot L^{-1}$ blood lactate ($v_{2[BLa]}$, $v_{4[BLa]}$) and VO_{2peak} were determined.

Results: During each period, the mean TID for the entire group was pyramidal (PP1: 84/12/4%, PP2: 80/12/8% and CP: 91/5/4% for Z1, Z2, Z3) and total training time on-water increased from 5.0 ± 0.9 h (PP1) to 6.1 ± 0.9 h (PP2) and 6.5 ± 1.0 h (CP). The individual ranges for Z1, Z2 and Z3 were 61–96, 2–26 and 0–19%. During PP2 VO_{2peak} ($25.5 \pm 11.4\%$) markedly increased compared to PP1 and CP and during PP1 $v_{2[BLa]}$ ($3.6 \pm 3.4\%$) showed greater improvement compared to PP2, but not to CP. All variables related to performance improved as the season progressed, but no other effects were observed. With respect to time-trial performance, the time spent in Z1 ($r = 0.66$, $p = 0.01$) and total time in all three zones ($r = 0.66$, $p = 0.01$) showed positive correlations, while the time spent in Z2 ($r = -0.57$, $p = 0.04$) was negatively correlated.

Conclusions: This seasonal analysis of the effects of training revealed extensive inter-individual variability. Overall, TID was pyramidal during the entire period of

observation, with a tendency toward improvement in VO_{2peak} , $v_{2[bla]}$, $v_{4[bla]}$ and time-trial performance. During PP2, when the COVID-19 lockdown was in place, the proportion of time spent in Z3 doubled, while that spent in Z1 was lowered; the total time spent training on water increased; these changes may have accentuated the improvement in performance during this period. A further increase in total on-water training time during CP was made possible by reductions in the proportions of time spent in Z2 and Z3, so that more fractions of time was spent in Z1.

Keywords: kayaking, training intensity distribution, training zones, high-volume training, pyramidal intensity distribution, water sport

INTRODUCTION

For decades, both coaches and researchers have sought to improve the performance of endurance athletes by determining the optimal schedule for training intensity (Stöggl and Sperlich, 2015). This intensity is routinely categorized into 3–5 different zones, depending on the sport, the approach of the sports federation concerned to diagnosing performance, monitoring of training, and the availability of appropriate technology (Stöggl and Sperlich, 2015).

This partitioning into zones allows the fractional distribution of exercise intensity (e.g., within a training session or a meso- and macrocycle) to be quantified. Previously, the following three-zone model has been employed most widely: (i) Zone (Z) 1, in which the intensity is at or below the aerobic threshold; (ii) Z2, with an intensity between the aerobic and anaerobic thresholds; and (iii) Z3, involving an intensity above the anaerobic threshold (Esteve-Lanao et al., 2005; Seiler and Kjerland, 2006; García-Pallarés et al., 2009, 2010; Plews et al., 2014; Baldassarre et al., 2019; Bellinger et al., 2020). [For further details concerning the concepts of aerobic and anaerobic thresholds, please see Faude et al. (2009)]. With this model, exercise performed predominantly in Z1 is often referred to as low-intensity continuous exercise or aerobic endurance training, Z2 as “threshold training” and Z3 as high-intensity interval training (Stöggl and Sperlich, 2015).

The training intensity distribution (TID) may vary between sports and seasons (i.e., the periods of preparation, transition, tapering, and competition) (Treff et al., 2017; Kenneally et al., 2020). A combination of all three zones involving substantial training in Z1 with relatively decreasing proportions of Z2 and Z3 is referred to as pyramidal (Stöggl and Sperlich, 2015); whereas a TID where the relationship between training in these zones is $Z1 > Z3 > Z2$, with a polarization index of >2.0 arbitrary units (Treff et al., 2019), is defined as “polarized” (Seiler and Kjerland, 2006).

Most retrospective analyses of the TID of athletes engaged in various endurance sports, such as rowing (Hartmann et al., 1990; Guellich et al., 2009; Plews et al., 2014), cycling (Lucia et al., 2000; Schumacher and Mueller, 2002; Zapico et al., 2007; Neal et al., 2011), swimming (Mujika et al., 1995; Baldassarre et al., 2019), running (Esteve-Lanao et al., 2005), triathlon (Neal et al., 2013) and cross-country skiing (Torvik et al., 2021), have revealed a pyramidal structure, with $>70\%$ of the training being performed in Z1. However, some retrospective analyses do report utilization of a polarized TID by successful cross-country skiers

(Seiler and Kjerland, 2006; Sandbakk et al., 2011; Tønnessen et al., 2014; Schmitt et al., 2020), runners (Billat et al., 2001) and rowers (Bourgois et al., 2014).

Interestingly, almost all investigations of TID to date have involved individual sports where the leg muscles produce most of the propulsion (e.g., cycling and running) (Lucia et al., 2000; Schumacher and Mueller, 2002; Billat et al., 2003; Zapico et al., 2007). There are relatively few reports of this nature about sports where both the arms and legs are directly involved in producing propulsion (e.g., cross-country skiing, rowing, swimming, and triathlon) (Hartmann et al., 1990; Mujika et al., 1995; Neal et al., 2011; Plews et al., 2014; Baldassarre et al., 2019; Torvik et al., 2021).

Sprint kayakers propel both the mass of their body and of the boat against the resistance of the water, which places extensive demands on the endurance of the relatively small upper-body muscles (Uali et al., 2012). Upper- and lower-body muscles differ substantially with respect to mass, fiber composition, extraction of oxygen (Calbet et al., 2005), and the contractile properties of muscle fibers (Gejl et al., 2021), as well as in the oxidation of glucose and lipid (van Hall et al., 2003; Calbet et al., 2005; Helge, 2010; Zinner et al., 2016; Ørtenblad et al., 2018). This indicates that the training required to achieve optimal adaptations in the upper and lower bodies differs both qualitatively and quantitatively. Furthermore, sport-specific differences in the demands of competition, the constraints of movement (e.g., weight-bearing vs. seated, concentric vs. plyometric work by the muscle-tendon complex), and the individual tolerance for training exert a considerable impact on training volume (Esteve-Lanao et al., 2017), as well as the amount of high-intensity work that can be tolerated (Sandbakk et al., 2021). These considerations indicate that the optimal long-term TID for kayak and canoe sprinting should differ from that for other sports involving primarily the legs.

To date, only two prospective reports have evaluated the utilization of different TID by elite sprint kayakers (García-Pallarés et al., 2009, 2010), revealing that for these athletes an emphasis on Z2 or Z3 is effective and comparable to the pyramidal or polarized TID in other sports in which the legs play a predominant role. However, prospective training interventions such as these are relatively short and often alter the typical training schedule in an artificial manner. To the best of our knowledge, the TID of highly trained sprint kayakers and canoeists during the periods of preparation, transition and competition and its association with changes in performance

have yet to be analyzed retrospectively. Accordingly, the present study was designed to assess these aspects of the training of such elite athletes.

MATERIALS AND METHODS

Experimental Design

This retrospective observational study was conducted from December 2019 until August 2020, i.e., one season for competitive kayakers and canoeists. **Figure 1** illustrates the time course, methods involved, and parameters obtained.

This season consisted of two preparation periods (PP1, 9–11 weeks and PP2, 17 weeks), together with the period of competition (CP, 7–8 weeks). Before and after each of these periods, the performance of all subjects was tested. The study period ended for each athlete with the German national championships, which took place during the first or second week of August, depending on age. PP2 overlapped in part with the period during which the first measures designed to counter the COVID-19 pandemic were enacted in Germany.

Participants

Initially, 21 athletes were enrolled in this study. Of these, 4 male and 7 female flatwater sprint kayakers, as well as one male canoeist (who was also included because the training regimes and diagnostic procedures for kayaking and canoeing are similar) provided complete information for at least one of the three periods, whereas the remaining 9 could not, due to, e.g., illness, injury, COVID-19 related quarantine, etc. and were therefore excluded. 4 women and 3 men, all kayakers, provided complete information for the entire period of investigation. The numbers of participants who provided complete HR data for each period and who were thereby included in the analysis were as follows:

for PP1: 10 kayakers (7 women, 3 men) and the male canoeist (subjects 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12); PP2: 8 kayakers (5 women, 3 men) (subjects 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11); and CP: 9 kayakers (5 women, 4 men) (subjects 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12).

These athletes were recruited from three different training facilities in Germany, all of which are official performance centers of the German and/or North Rhine-Westphalian Canoe Federation. Their key anthropometric, physiological and performance characteristics are documented in **Table 1**.

During the season examined, 5 of the 12 participants included in the statistical analyses were members of the German Development Team, one had belonged to the German National Under 23 Team during the preceding year and 6 were members of the Western German Regional Team. All had competed in kayaking or canoeing for at least 6 years and during the study period were competing at the highest national level.

All of these athletes had undergone testing frequently throughout their career and were therefore quite familiar with all testing procedures employed. After being informed in detail about these procedures, as well as the risks and benefits of this investigation, all of the athletes and their legal guardians consented in writing to their participation. All procedures were approved by the institute's ethics committee and conducted in accordance with the Declaration of Helsinki.

Monitoring of Training

Heart Rate, Distance, and Duration

The heart rate (HR) of each athlete during each training session, as well as the distance and duration, were monitored with a watch receiving Global Positioning System (GPS) data (M430, Polar Electro OY, Kempele, Finland) and stored online (Polar Flow, Polar Electro OY). The athletes initiated recording at the beginning of warm-up and stopped immediately after cool-down.

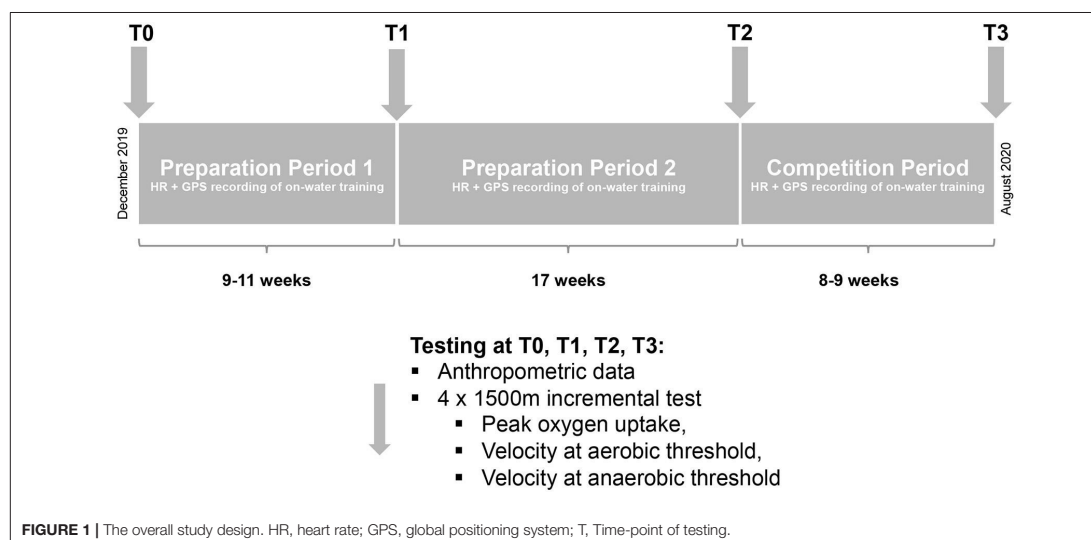


FIGURE 1 | The overall study design. HR, heart rate; GPS, global positioning system; T, Time-point of testing.

TABLE 1 | Characteristics of the participants before (Pre) and at the end of (Post) the period of observation.

Participant Nr.	Discipline	Sex	Age (years)		Height (cm)		Body mass (kg)		Body mass index [$\text{kg} \cdot (\text{m}^2)^{-1}$]		Peak oxygen uptake ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$)		Personal best times at national championships 2020 [s]		
			Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	200 m	500 m	1,000 m
1	C	m	17	18	178	178	74.8	74.9	23.6	23.6	3,391	4,047	<45	<120	<272
2	K	m	17	18	182	182	80.0	80.9	24.2	24.4	3,635	4,217	<39	<106	<225
3	K	m	17	18	195	198	85.9	88.9	22.6	22.7	4,452	5,427	<41	<106	<226
4	K	m	22	23	179	179	72.8	75.3	22.7	23.5	4,466	4,727	n.d.	<106	<223
5	K	m	15	16	180	187	71.7	76.7	22.1	21.9	3,122	4,069	n.d.	<108	<231
6	K	w	16	17	170	170	67.6	66.3	23.4	22.9	2,576	2,975	<43	<120	<262
7	K	w	17	18	174	174	71.2	76.5	23.5	25.3	2,700	3,478	<48	<124	<265
8	K	w	20	21	171	171	73.3	73.2	25.1	25.0	3,381	3,684	<45	<122	<262
9	K	w	15	15	167	167	60.5	62.7	21.7	22.5	2,729	2,881	n.d.	<125	<258
10	K	w	15	16	175	175	61.6	64.5	20.1	21.1	2,836	3,197	<46	n.d.	<272
11	K	w	16	16	177	177	69.7	75.4	22.3	24.1	2,555*	3,865	<45	<122	<258
12	K	w	16	17	166	166	66.4	68.0	24.1	24.7	2,985	3,038#	<47	<125	<266
Mean			16.9	17.8	176	177	71.3	73.6	23.0	23.5	3,236	3,800	43.6	116.1	251.1
SD			2.1	2.3	7.8	9.0	7.1	7.4	1.2	1.3	666	763	3.1	8.3	19.5

*This value is based on the test performed after preparatory period 1, since the data from initial testing were unreliable. This value is provided simply to enable evaluation of the individual's development and was not included in the analysis of TID.

#This value is based on the test performed before the period of competition, since the data from the final testing were unreliable. This value is provided simply to enable evaluation of the individual's development and was not included in the analysis of TID.

C, Canoe; K, Kayak; n.d., not determined; m, man; w, woman.

All sets of data found by visual inspection to contain artifacts (e.g., flatline) or be incomplete due to technical problems (e.g., low battery, inaccurate monitoring of HR or GPS data, etc.) were excluded from further analysis. In addition, an experienced coach compared the number of sessions recorded with the online training diary of each athlete to detect potential discrepancies. **Table 2** shows the mileage indicated by the HR monitor and included in the analysis as a percentage of the mileage reported by each athlete in his/her online training diary. The lower limit for inclusion was set at 70%. Furthermore, the raw data provided by the HR monitor (Polar Flow software) were inspected by experienced coaches for flawed or unreasonable values, which were also removed. Following these quality controls, the total amount of time spent in each zone during each training session was calculated.

Definition of the Different Intensity Zones

Utilizing the categorization proposed by Seiler (2010), Zone 1 (Z1), 2 (Z2) and 3 (Z3) were defined as when the HR corresponded to values observed at an exercise intensity of 60–80%, 81–87% and $\geq 87\%$ of peak oxygen consumption ($\text{VO}_{2\text{peak}}$), respectively. $\text{VO}_{2\text{peak}}$ was obtained from the incremental step-test performed prior to each period.

Polarization Index

To quantify the individual levels of periodization, we calculated a Polarization-Index (Pol-Index in arbitrary units) based on the time spent in each intensity zone, as described in detail previously (Treff et al., 2017, 2019). The Pol-Index was calculated as:

$$\text{Pol-Index (a.u.)} = \log(Z1 \cdot Z2^{-1} \cdot Z3).$$

TABLE 2 | The mileage indicated by the GPS watch and included in data analysis as a percentage of the mileage reported in the online diary by each individual athlete for each training period.

Participant Nr.	Training period		
	PP1	PP2	CP
1	100%		
2	100%	100%	71%
3	100%	100%	100%
4	88%	100%	94%
5	90%	78%	100%
6	100%	100%	100%
7	86%	89%	
8	78%	95%	100%
9	97%		
10	100%	100%	100%
11	94%		100%
12			100%

Incremental Testing

All testing on-water was conducted on the regatta course in Duisburg-Wedau (Germany), the venue for several international canoe sprint championships, as well as for the World Cup series arranged by the International Canoe Federation (ICF). The participants were requested to refrain from all physical exercise for 12 hours and from exhausting exercise for 48 hours prior to the experimental sessions, as well as to maintain their normal diet. In addition, the athletes were instructed to avoid food

intake for two hours prior to testing, to arrive well-hydrated state and to refrain from consuming caffeine on the day of testing. Their physical activity, diet and hydration were assessed with questionnaires administered prior to the tests.

The incremental test protocol consisted of 1,500-m trials on water at 70, 80, and 90% of peak HR (HR_{peak}), as well as an all-out effort, as described in detail previously (Matzka et al., 2021). Each test involved a 180° turn at the half-way mark (i.e., after 750 m), in attempt to minimize the influence of wind and waves on performance. The wind speed, air temperature, water temperature, humidity, and atmospheric pressure on the days of testing are shown in **Table 3**. The water temperature was measured with a thermometer (TFA Dostmann Marbella, TFA Dostmann GmbH and Co. KG, Germany) and all other data concerning the weather collected by the weather station located at the regatta course (Duisburg-Wedau, Germany). The time-point for each change in direction was determined on the basis of the GPS data.

As members of the Canoe Federation of North-Rhine-Westphalia, all of our subjects were highly experienced in performing this particular protocol, which has been employed by this federation for decades and the results of which correlate closely with kayaking performance during ergometric testing in the laboratory (Matzka et al., 2021). Indeed, this extensive experience was considered important for achieving optimal reliability and validity. In fact, in connection with previous investigations employing a protocol that differed only slightly from our own with respect to the number, duration, and intensity of incremental steps, the reliability and validity of measurements of HR, oxygen consumption (VO_2), blood lactate and stroke rate were all reported to be acceptable to excellent (Carrasco Páez et al., 2010; Winchcombe et al., 2019; Matzka et al., 2021).

The HR utilized for the first test was the HR_{peak} obtained 6–8 weeks before by the Western German Canoe Federation utilizing the same incremental on-water test protocol and each subsequent test utilized the maximal HR (considered to be

HR_{peak}) attained during the preceding test. The 30–45 s interval between successive steps was required to sample capillary blood from the earlobe. All participants received continuous visual feedback from the HR monitor (Polar Wear Link System and V800 HR Monitor, Polar Electro OY, Kempele, Finland) mounted directly in front of them, which averaged this value every second.

During each stage stroke rate was self-selected. Maximal exhaustion was considered to have been reached when three of the four following criteria were met: (1) a plateau in oxygen uptake (i.e., an increase of $\leq 1.0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, despite an increase in velocity); (2) a respiratory exchange ratio >1.1 ; (3) a HR within $\pm 5\%$ of the HR_{peak} obtained from previous incremental test; and (4) a peak blood lactate concentration $\geq 6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. In addition, the rating of perceived exertion (RPE) on the 6–20-point Borg scale (Borg, 1970) had to be ≥ 18 .

For analysis of lactate (Lactate Pro 2, Arkray KDK, Kyoto, Japan), capillary blood was sampled from the right earlobe at baseline and following each step. The velocities associated with blood lactate concentrations of 2 ($v_{2[BLa]}$) and 4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ($v_{4[BLa]}$) were determined by linear interpolation between the two nearest points, as previously described (Zinner et al., 2018). At these same time-points, RPE was assessed employing the 6–20-point Borg scale (Borg, 1970).

Oxygen uptake was monitored continuously by an open-circuit breath-by-breath analyzer (MetaMax 3B, Cortex Biophysik, Leipzig, Germany), employing standard algorithms to compensate for the time delay between gas consumption and the signal. This analyzer was calibrated prior to each test with both 15.8 and 5% O_2 in N_2 (Praxair, Düsseldorf, Germany), i.e., concentrations that cover the range of the expected fractional concentration of O_2 . The volume sensor was calibrated with a precision 3-L syringe (Cortex Biophysik, Leipzig, Germany). Average respiratory values were calculated for the last 120 s of each individual increment. The highest VO_2 (averaged over 30-s intervals) was considered to be VO_{2peak} .

Statistical Analyses

Application of the Shapiro-Wilk test revealed that all data were distributed normally, making transformation unnecessary. For analysis of differences between the amount of time spent in each of the three training zones during each period of training, the use of repeated-measures ANOVA would have required exclusion of incomplete data sets, which would have reduced statistical power. This is also the case with respect to analysis of the interactions between training period and the dependent variables VO_{2peak} , $v_{2[BLa]}$, $v_{4[BLa]}$ and performance time in connection with the all-out 1,500-m time-trial. Consequently, we chose to utilize a linear-mixed model for these analyses.

As shown in **Table 4**, data for eleven, ten, nine and eight athletes could be collected at T0, T1, T2, T3, respectively and were included in the analyses for PP1, PP2 and CP. For comparison of the amount of time spent in the different training zones during each training period, these periods were the fixed factor and the subjects the random factor. For analysis of the effects of the training period on the different parameters of related to performance, the four time-points of incremental

TABLE 3 | Weather conditions during each day of testing.

	T0	T1	T2	T3
Air temperature (°C)	4.0 ± 2.2	6.5 ± 0.7	24.0 ± 1.8	25.5 ± 2.3
Wind speed (km·h ⁻¹)	9.1 ± 2.2	25.7 ± 4.3	17.6 ± 4.2	17.4 ± 7.6
Water temperature (°C)*	7.5	6.3	18.4	20.7
Humidity (%)	88 ± 7	70 ± 6	51 ± 7	64 ± 9
Atmospheric pressure (hPa)	1,024 ± 0.3	1,019 ± 1.1	1,006 ± 0.8	1,009 ± 0.5

T0, immediately prior to PP1; T1, immediately prior to PP2; T2, immediately prior to CP; T3, immediately after CP.

*In our experience, water temperature does not change during the duration of our testing to an extent that would exert a measurable impact on performance. Therefore, this temperature was measured only once, half-way through the period of testing on each day.

testing were the fixed factor and the subjects the random factor. When a significant fixed-effect was found, pair-wise comparison of each training period and time-point of testing was also performed. Family-wise error was corrected for by utilizing the Bonferroni *post-hoc* test. The Statistical Package for Social Science (version 26; IBM Corp., Armonk, NY) was utilized for these analyses.

For analysis of potential correlations between the various physiological characteristics and parameters related to performance, on the one hand, and the time spent in each individual zone, the total time spent in all three zones, and the Polarization Index, on the other hand, repeated-measures correlation for determination of within-individual association regarding paired measures assessed on several occasions for a number of different individuals was applied using the R software, as described previously (Bakdash and Marusich, 2017). As in the case with the linear mixed model, this analysis included only the pre- and post-values of the physiological measures of performance for each individual training period and athlete, if the data were complete (Table 4). The descriptors for the correlation values obtained were as follows: $r < 0.1$ —very small, $0.1 \leq r < 0.3$ —small, $0.3 \leq r < 0.5$ —moderate, $0.5 \leq r < 0.7$ —large, $0.7 \leq r < 0.9$ —very large, $r \geq 0.9$ —nearly perfect (Hopkins, 2002).

For all statistical analyses significance was defined as $p \leq 0.05$. All values concerning the entire group are presented as means with standard deviations.

RESULTS

The current analysis included 2,132 individual sessions of training during a period of 34–37 weeks, covering ~17,900 km and lasting for a total of about 2,000 h. As indicated by the athletes' online training diaries, the average overall time spent training each week was 12.3 ± 1.8 h, including 6.5 ± 1.2 h on-water, 3.0 ± 0.5 h strength training, 2.1 ± 0.5 h general endurance training (e.g., running, swimming, cycling) and 0.6 ± 0.4 h of other activities (e.g., stretching, etc.) (Figure 2). The number of weekly training sessions on water increased from 5.6 ± 0.8 during PP1 to 6.9 ± 0.8 during PP2 and 8.7 ± 1.5 h during CP, with the corresponding total training time on-water increasing from 5.0 ± 0.9 h to 6.1 ± 0.9 h and, finally, 6.5 ± 1.0 h.

The TIDs for each period and each participant are summarized in Figure 3, with Figure 4 documenting the corresponding Pol-Indices.

For the entire season the fractions of training performed in Z1, Z2 and Z3 were 85 ± 11 , 10 ± 7 and $5 \pm 5\%$, respectively (Pol-Index: 1.6 ± 0.3). For PP1, the corresponding values were 84 ± 11 , 12 ± 8 and $4 \pm 4\%$ (Pol-Index: 1.4 ± 0.4); in the case of PP2, 80 ± 12 , 12 ± 7 and $8 \pm 6\%$ (Pol-Index: 1.4 ± 0.2); and during CP 91 ± 5 , 5 ± 4 and $4 \pm 2\%$ (Pol-Index: 1.8 ± 0.2) (Figures 3, 4). Application of linear mixed-model analysis revealed an effect of the training period on Z1 ($p < 0.01$), but not Z2 ($p = 0.15$) or Z3 ($p = 0.08$). Bonferroni-adjusted *post-hoc* analysis of Z1 showed differences between PP1 (211 ± 47 min per week) and CP (310 ± 57 min per week) [$p < 0.01$, $d = -1.91$, 95%CI (-2.88 to -0.78)],

as well as between PP2 (237 ± 54 min per week) and CP [$p = 0.03$; $d = -1.30$, 95%CI (-2.27 to -0.20)].

The corresponding ranges were as follows: During PP1 the proportions of Z1, Z2 and Z3 were 61–94, 3–26 and 0–13%, respectively (Pol-Index: 0.9–1.9); for PP2 64–95, 4–26 and 1–19% (Pol-Index: 1.4–2.0); and in the case of CP 81–96, 2–13 and 1–6% (Pol-Index: 1.6–2.0). During PP1 11 of the athletes exhibited a pyramidal TID (Pol-Index < 2.0). The corresponding value for PP2 was 6, with two (participants 3 and 8) exhibiting a more polarized TID (Pol-Index: 1.91–1.99), with higher proportions of Z3 than Z2. During the CP, participant 6 displayed a polarized TID (Pol-Index: 2.04), while the TID of the other 8 was pyramidal (Pol-Index: 1.58–1.94).

Table 4 summarizes the values for physiological characteristics and parameters related to performance prior to and after each training period.

Application of a linear mixed model revealed that the period of training exerted an impact on changes in $v2_{[bla]}$ ($p = 0.03$) and VO_{2peak} ($p > 0.01$). Bonferroni-adjusted *post-hoc* analysis showed differences between changes in $v2_{[bla]}$ during PP1 ($3.62 \pm 3.43\%$) and PP2 ($-0.84 \pm 2.16\%$) [$p = 0.04$, $d = 1.48$, 95%CI (0.33 – 2.47)], but not between PP2 and CP ($2.67 \pm 2.37\%$) [$p = 0.08$, $d = -1.53$, 95%CI (-2.57 to -0.30)] or PP1 and CP [$p = 1.00$, $d = 0.31$, 95%CI (-0.64 to 1.23)]. Regarding VO_{2peak} , such analysis revealed differences in the changes during PP1 ($-3.11 \pm 5.94\%$) and PP2 ($25.48 \pm 11.38\%$) [$p < 0.01$, $d = -3.06$, 95%CI (-4.34 to -1.42)], as well as between PP2 and CP ($0.34 \pm 12.06\%$) [$p = 0.04$, $d = 1.90$, 95%CI (0.52 – 3.01)], but not between PP1 and CP [$p = 1.00$, $d = -0.38$, 95%CI (-1.32 to 0.60)]. In contrast, time-trial performance ($p = 0.35$) and $v4_{[bla]}$ ($p = 0.89$) were independent of the period of training. Table 5 documents the percentage change in each parameter of performance from before to after each period of training.

The relationships between training variables and alterations in physiological parameters, as well as changes in performance in the 1,500-m time-trial are summarized in Table 6.

DISCUSSION

The current retrospective investigation was designed (i) to describe the TID of elite sprint kayakers and a canoeist during the two different preparatory, as well as the competitive period of a single training season and (ii) to evaluate the relationship between the distribution of time spent in each training zone and alterations in parameters related to performance. To the best of our knowledge, this is the most thorough study on these topics to be reported to date.

Seasonal Analysis of the Distribution of Training Intensity Observation at the Group Level

The present observation that the training intensity of our group of athletes was pyramidal in structure throughout the entire season is in accordance with other reports on the large amounts of time spent in Z1 by rowers (Steinacker et al., 1998; Guellich et al., 2009; Nybo et al., 2014; Plews et al., 2014; Treff et al., 2017),

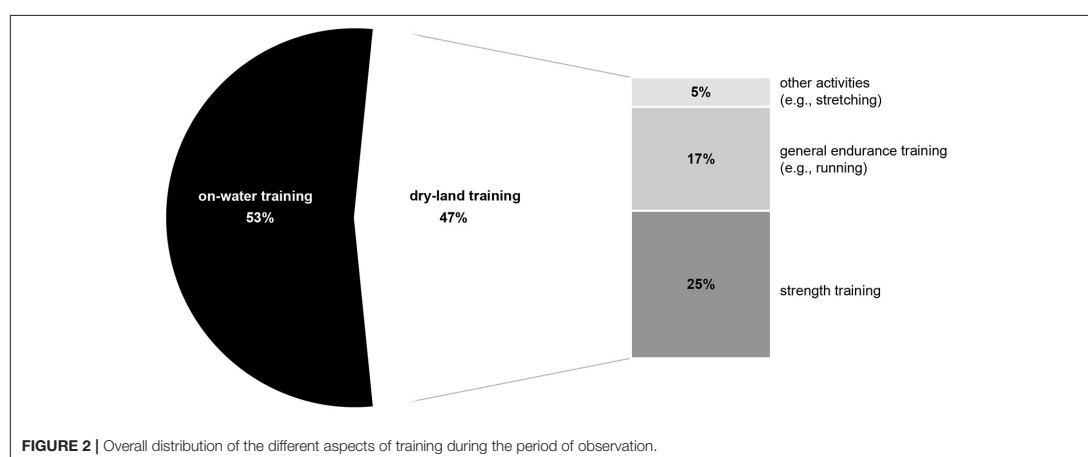
TABLE 4 | Physiological characteristics and parameters related to performance at the four time-points for testing.

Variable	T0 (n = 11)	T2 (n = 10)	T3 (n = 9)	T4 (n = 8)
1,500-m time-trial performance (s)	419 ± 27 (n = 11)*	417 ± 30 (n = 10)*	400 ± 33 (n = 9)*	394 ± 33 (n = 8)*
VO _{2peak} (ml·min ⁻¹)	3,315 ± 694 (n = 10)*	3,212 ± 738 (n = 10)*	4,001 ± 1,136 (n = 8)*	3,954 ± 861 (n = 8)*
v _{2[Bla]} (km·h ⁻¹)	11.67 ± 0.76 (n = 11)*	12.14 ± 0.78 (n = 10)*	12.05 ± 0.78 (n = 9)*	12.48 ± 0.74 (n = 8)*
v _{4[Bla]} (km·h ⁻¹)	12.33 ± 0.79 (n = 11)*	12.69 ± 0.86 (n = 10)*	13.02 ± 0.82 (n = 9)*	13.34 ± 0.82 (n = 8)*

T0, immediately prior to PP1; T1, immediately prior to PP2; T2, immediately prior to CP; T3, immediately after CP.

1,500-m time-trial performance, performance in connection with the all-out 1,500-m trial during the incremental step test; VO_{2peak}, peak oxygen uptake; v_{2[Bla]}, velocity associated with a blood lactate concentration of 2 mmol·L⁻¹; v_{4[Bla]}, velocity associated with a blood lactate concentration of 4 mmol·L⁻¹.

*Only those athletes for whom HR monitoring for the period indicated was complete and data from the incremental testing at the four different time-points reliable were included in each analysis. This explains why the numbers of participants analyzed at each time-point and, to a certain extent, with respect to the different variables, are not the same.

**FIGURE 2 |** Overall distribution of the different aspects of training during the period of observation.

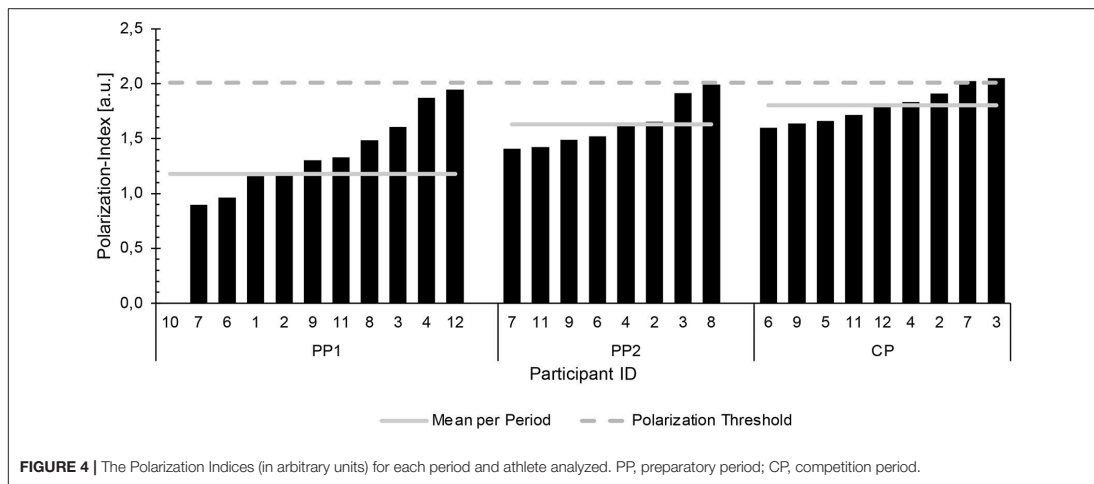
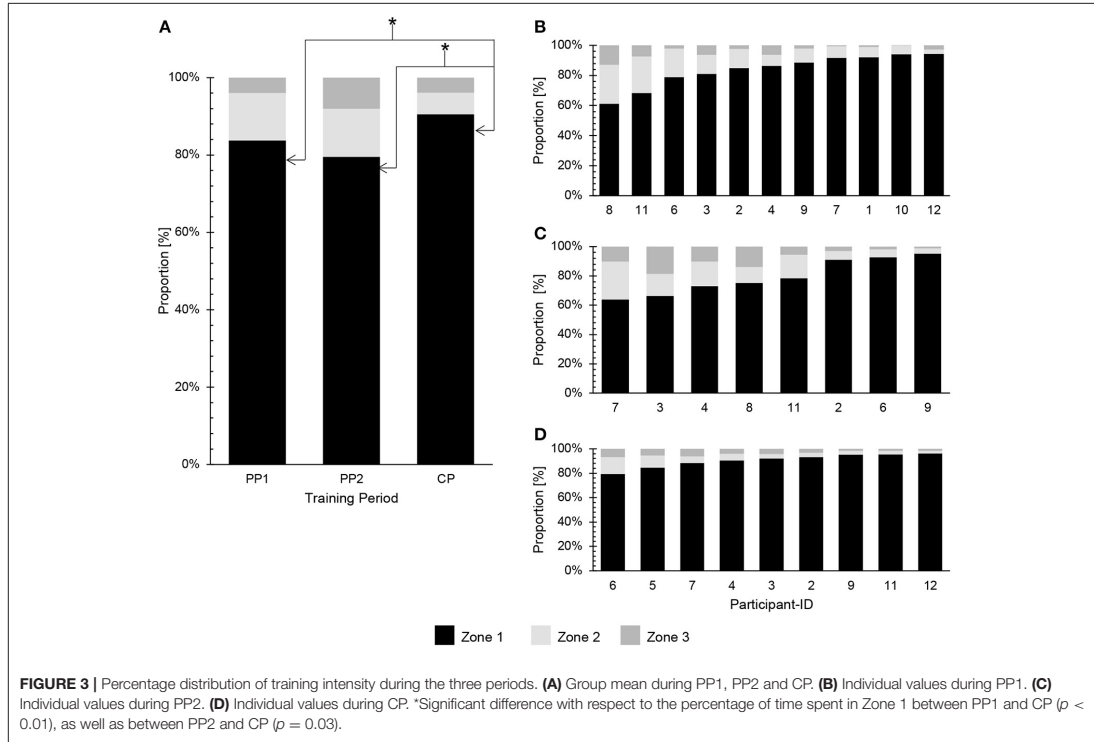
cyclists (Lucía et al., 2000; Schumacher and Mueller, 2002; Zapico et al., 2007; Neal et al., 2011), triathlon athletes (Neal et al., 2013), cross-country skiers (Torvik et al., 2021) and runners (Esteve-Lanao et al., 2005). One explanation for this finding is that low-intensity training is needed to counteract potential negative effects (e.g., autonomic and hormonal stress, energy depletion) of training at intensities at or above threshold intensity (Bourgeois et al., 2019).

In contrast, two prospective examinations of the TID of elite Spanish sprint kayakers describe an emphasis on Z2 and Z3, with a block of high-intensity peaking designed to improve submaximal and maximal performance (García-Pallarés et al., 2009, 2010). The first of these studies involved 12 weeks of such block periodization and the follow-up study this same 12-week block periodization in combination with 22 weeks of linear periodization divided into three periods of training. The first period of each model was designed to improve the anaerobic threshold, the next period aimed to improve maximal aerobic power and the final

period was meant to improve specific race pace. These two investigations found that both models of periodization improve all parameters related to performance, with similar enhancement in VO_{2peak} (9.0–9.9%) and VO₂ at the anaerobic threshold (7.8–8.6%) and more pronounced improvement in paddling speed at VO_{2peak} with block periodization (5.8 vs. LP: 3.3%).

The markedly higher proportions of their training that sprint kayakers spend in Z2 and Z3 in comparison to athletes involved in other sports might reflect differences in the type of muscular work being performed. During kayaking, propulsion is generated primarily by the upper-body musculature, whereas sports such as running, cycling, rowing, skiing, etc., involve primarily lower-body or even whole-body work for propulsion. For example, while using a cycle ergometer, kayakers can sustain an intensity of arm cranking at VO_{2max} significantly longer than cyclists (Billat et al., 1996).

These differences also lead to differences in the types of biomechanical stress (i.e., force generation by muscles and



joints, frequency of movement, impact on muscles and joints, etc.) associated with sports that involve primarily the legs or arms and/or with sports that entail weight-bearing and

those that do not, which may help explain differences in TID (Bourgeois et al., 2019; Sandbakk et al., 2021). In addition, differences in cardiorespiratory and vascular demands, as well

TABLE 5 | Back-transformed means (in %) \pm standard deviations for the percentage of each parameter related to performance and training period.

Parameter	Training period		
	PP1	PP2	CP
$v2_{[BLA]}$	3.62 \pm 3.43* (<i>n</i> = 10)	-0.84 \pm 2.16 (<i>n</i> = 7)	2.67 \pm 2.37 (<i>n</i> = 8)
$v4_{[BLA]}$	2.63 \pm 2.82 (<i>n</i> = 10)	2.72 \pm 2.24 (<i>n</i> = 7)	1.40 \pm 3.86 (<i>n</i> = 8)
VO_{2peak}	-3.11 \pm 5.94* (<i>n</i> = 9)	25.48 \pm 11.38† (<i>n</i> = 6)	0.34 \pm 12.06 (<i>n</i> = 8)
1,500-m time-trial performance	-0.16 \pm 4.12 (<i>n</i> = 10)	-3.46 \pm 3.53 (<i>n</i> = 7)	-0.38 \pm 4.45 (<i>n</i> = 8)

*Significantly different from PP2; † significantly different from CP.

as metabolic load and/or the types of muscle fibers recruited may also contribute to dissimilarities in TID (Bourgois et al., 2019). Moreover, with Olympic races lasting from no more than 35 s (200 m) to \sim 240 s (1,000 m), kayaking and canoeing sprints place greater short-term demands on the athlete than do sports such as road cycling, long-distance running, and cross-country skiing. Nonetheless, our observation that over the course of the season the pyramidal TID of elite kayakers and canoeists tends to become more polarized, with a substantial increase in the time spent in Z1 and less in Z2 and Z3, is in accordance with earlier reports on elite athletes participating in a variety of endurance sports, including rowing (Guellich et al., 2009; Plews et al., 2014), cross-country skiing (Sandbakk et al., 2011; Tønnessen et al., 2014; Solli et al., 2017), running (Robinson et al., 1991) and cycling (Lucía et al., 2000) (Figure 3D).

This successive change in TID was accompanied by a 1.5-h increase in the total training time per week. In their study on young world-class rowers, Guellich et al. (2009) observed a similar pattern and suggested that, not unexpectedly, this increase requires more sessions of low-intensity exercise in order to avoid excess fatigue and overtraining. However, in our case, this shift to more low-intensity training only occurred during the CP, even though the total volume of training in PP2 was already higher than in PP1.

It is interesting to speculate that this increase in the overall volume of specific training without corresponding reductions in the amounts of Z2 and Z3 might reflect the greater opportunity for physical and psychological recovery associated with the COVID-19-lockdown during PP2. In this context, comparison of 4-week periods before and after this lockdown was imposed indicated that during the lockdown more sleep and time spent lying down, in combination with less moderate-to-vigorous physical activity improved recovery for at least certain athletes (Zinner et al., 2020). Improvements in sleep are known to exert a particularly positive effect on both recovery and performance (Watson, 2017). This proposal is in line with recent research stressing the importance of a more holistic approach to the factors that influence performance (e.g., life stress, sleep, daily physical activity, nutrition, etc.) when analyzing the effects of

training, including the distribution of training intensity, on athletes (Sperlich and Holmberg, 2017; Kiely, 2018).

Observations on Individual Athletes

In contrast to the overall changes in TID as the season progressed, assessment of individual athletes resulted in a more heterogeneous pattern (Figures 3B–D). For example, during PP1 subjects 1, 7, 10, and 12 performed extremely large amounts of training in Z1 (as much as 94%) and extraordinarily little to almost none in Z2 and Z3; while others spent markedly less time in Z1 (e.g., 61 and 68% in the case of subjects 8 and 11, respectively) and more time in Z2 and Z3. Furthermore, even for one and the same athlete, the volume of training and distribution of its intensity varied considerably week-to-week throughout the entire season (cf. Figures 5A–C).

This extensive inter- and intra-athlete variability raises questions concerning the interpretation of group means and patterns. Such pronounced individual differences in TID patterns (Bourgois et al., 2019) may reflect, among other factors, differences in genetic make-up, biomechanical characteristics, physiological profile, biological age, training age and experience, off-training physical activity, recovery strategies, environmental conditions and psychological stress (Sperlich and Holmberg, 2017; Kiely, 2018). Overall, successful coping with stressors by the individual athlete probably plays a more important role in optimizing both short- and long-term performance than any particular distribution of training intensity during any given period of training.

Seasonal Changes in Parameters Related to Performance

Although the only statistically significant alterations in parameters related to performance observed here were a more pronounced increase in $v2_{[BLA]}$ (+3.6%) following PP1 than after PP2, but not after CP, and a greater elevation in VO_{2peak} (\pm 25.5%) after PP2 than following either PP1 or CP (Table 5), our results are to a certain extent comparable to previous reports. For instance, the improvement in $v2_{[BLA]}$ and $v4_{[BLA]}$ during PP1 are comparable to those observed by García-Pallarés et al. (2009, 2010). However, after a period without training, the sprint kayakers in these other investigations could elevate their paddling speed at the second ventilatory threshold by 2.2% through training in blocks during which 55–67% of the overall time was spent at or above an intensity corresponding to the anaerobic threshold (Z3). In contrast, our athletes, who only trained 4% of the time at intensities above the anaerobic threshold (Z3) and 12% at threshold intensities (Z2), exhibited a similar increase (\sim 2.6%).

Previously, Ingham et al. (2008) found that in the case of rowers, more training at or above threshold intensity improved performance less than a large amount of low-intensity training at the lactate threshold. This observation is in accordance with indications that training more than 20% of the time at Z2 may have a negative impact on the autonomic nervous system (Esteve-Lanao et al., 2007), leading to less favorable adaptation of performance, potentially due to stress and the likelihood of down-regulation of the sympathetic nervous system in response

TABLE 6 | Correlations between the differences in physiological characteristics and parameters related to performance before and after each of the three training periods (PP1, PP2, CP), on the one hand, and the time spent in each training zone, total time spent in all three zones, and the Polarization Index, on the other.

	VO _{2peak}		v _{2[bla]}		v _{4[bla]}		1,500-m time-trial performance					
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>				
	95%CI [LL-UL]		95%CI [LL-UL]		95%CI [LL-UL]		95%CI [LL-UL]					
Time in Zone 1 each week	-0.25	0.43	0.06	0.86	-0.41	0.16	0.66	0.01				
	-0.76	-	0.45	-0.56	-	0.63	-0.81	-	0.25	0.10	-	0.90
Time in Zone 2 each week	0.37	0.24	-0.07	0.83	0.53	0.06	-0.57	0.04				
	-0.34	-	0.81	-0.64	-	0.55	-0.10	-	0.86	-0.87	-	0.05
Time in Zone 3 each week	0.40	0.20	-0.17	0.59	0.18	0.56	-0.36	0.22				
	-0.31	-	0.82	-0.70	-	0.48	-0.47	-	0.70	-0.79	-	0.30
Total time in Zones 1–3 each week	-0.25	0.43	0.06	0.86	-0.41	0.16	0.66	0.01				
	-0.76	-	0.45	-0.56	-	0.63	-0.81	-	0.25	0.10	-	0.90
Polarization Index	0.12	0.71	0.13	0.68	-0.21	0.49	0.22	0.46				
	-0.55	-	0.70	-0.51	-	0.68	-0.72	-	0.44	-0.43	-	0.73

1,500-m time-trial performance, performance in connection with the all-out 1,500-m trial during the incremental step test; VO_{2peak}, peak oxygen uptake; v_{2[bla]}, velocity associated with a blood lactate concentration of 2 mmol·L⁻¹; v_{4[bla]}, velocity associated with a blood lactate concentration of 4 mmol·L⁻¹; 95%CI [LL-UL], *p*, significance values; *r*, correlation values; 95% Confidence Interval Lower Limit – Upper Limit. Significant correlations are highlighted in bold.

to a large volume of high-intensity exercise (Esteve-Lanao et al., 2007). As mentioned above, extensive training might produce a need for a high proportion of low-intensity exercise designed to avoid excessive fatigue (Guellich et al., 2009). However, the sprint kayakers involved in the studies by García-Pallarés et al. (2009, 2010) had trained longer and performed better than our subjects. Thus, even small improvements in the performance of those athletes may have been more difficult to achieve, requiring more high-intensity training.

Our findings indicate that PP2 elicited improvements in v_{4[BLa]} (2.7%), VO_{2peak} (25.5%) and 1,500-m time-trial performance (3.5%), probably by increasing the training time spent in Z3 at the expense of Z1. Previous research has shown that higher proportions of Z3 may elicit superior adaptations that improve performance (Driller et al., 2009; Chéillechair et al., 2017). In our case, the extraordinary restrictions imposed by the COVID-19 pandemic during this training period could possibly have augmented such exceptional adaptations, conceivably by allowing more recovery from training. In comparison, with higher proportions of training intensities at or near VO_{2peak} during two blocks 5 and 6 weeks long, elite Spanish sprint kayakers improved their VO_{2peak} by 5–7%, with no change in velocity at the anaerobic threshold or paddling speed at VO_{2peak} during an incremental test on a kayak ergometer (García-Pallarés et al., 2009, 2010). It is worth noting that the differences in air and water temperature between testing at T2 and T3 may have had an influence on our results as well.

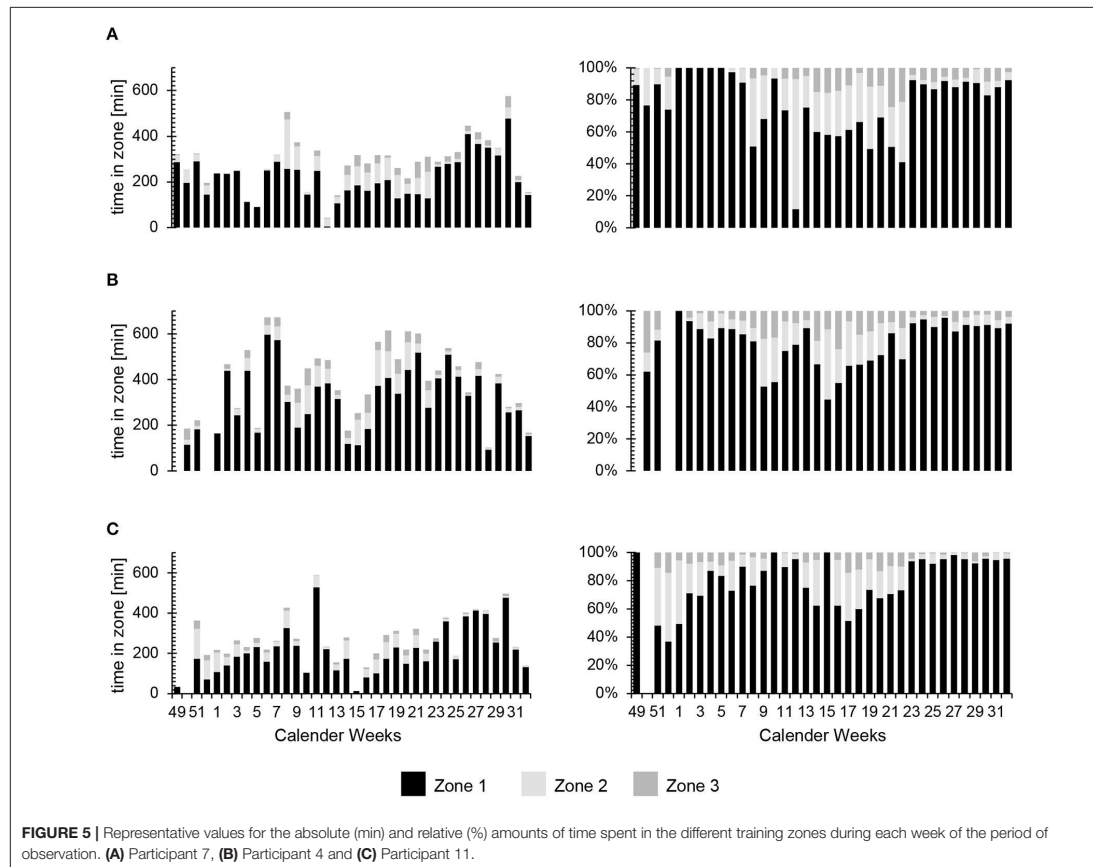
During the CP we observed additional improvement in the velocity at both the anaerobic (1.4%) and aerobic thresholds (2.7%). The lack of marked changes in VO_{2peak} (0.3%) or 1,500-m time-trial performance (0.4%) is comparable to the findings by Treff et al. (2017) in connection with an 11-week period of preparation for competition by elite German rowers. With a TID comparable to that of our athletes, these rowers exhibited

no change in VO_{2peak} or 2,000 m-TT performance, but, in contrast to our present observations, no alteration in power with a blood lactate concentration of 2 or 4 mmol·L⁻¹ either. In contrast, following tapering phases 2 (García-Pallarés et al., 2009) or 4 weeks in duration (García-Pallarés et al., 2010), the paddling speed of elite sprint kayakers at VO_{2peak} during an incremental test on a kayak ergometer was improved, with no changes in any physiological parameters related to performance. This difference might reflect the fact that 45–47% of the training by those kayakers was in Z3, compared to only 4% in our case, and/or to the different incremental test employed by the Spanish researchers.

It should be noted that our relatively small study population probably reduced the ability to confirm the statistical significance of small changes in the parameters monitored. A recent analysis concluded that changes as small as ~0.3–0.6% in the performance of international canoeists and kayakers improves their chances of winning a medal substantially (Bonetti and Hopkins, 2010). Thus, even the 0.4% improvement in 1,500-m time-trial performance following the CP observed here may be of significance.

Correlations Between the Distribution of Exercise Intensity and Parameters Related to Performance

In addition, the time spent in Z1 and total training time in all three zones demonstrated a pronounced positive correlation with the improvement in 1,500-m time-trial performance. This indicates that if, at the same time, the overall volume of training is reduced, the improvement is derived from Z2 training only, which agrees well with an earlier report (Esteve-Lanao et al., 2007). This finding may reflect the negative impact of Z2 training on the autonomic nervous system (e.g., increased stress) discussed above. Of relevance



to these considerations is our observation that changes in TID from PP2 to CP decreased the proportion of time spent in Z2 from $12 \pm 7\%$ to $5 \pm 4\%$, indicating that adaptations in response to Z2 exercise intensity are not beneficial during the phase of competition, at least not in connection with canoe sprinting.

When interpreting the correlations observed, it is important to be aware of the limitation that we included neither the TID of non-specific training (e.g., strength training, dry-land endurance training, etc.) nor off-training variables in our analysis.

LIMITATIONS

Certain limitations associated with the current investigation warrant consideration. The relatively small number of subjects, as well as the fact that data for certain individual periods of

training were missing almost certainly affected our statistical analysis, especially with respect to a potential type-II error. At the same time, it is difficult to conduct investigations of this nature on large numbers of highly trained athletes, who must prioritize their own individual training and competition. Furthermore, although we chose to include one canoeist since the training of sprint canoeists and kayakers in Germany is similar, the differences in the biomechanical characteristics of and muscle groups involved in these two sports may have affected the results obtained. Moreover, it is important to note that with about half of the training being performed on land (**Figure 2**), analysis of TID on-water does not cover all of the stress to which these athletes are exposed. More general training (e.g., resistance training, endurance training on land, etc.), as well as various additional factors (e.g., sleep, daily physical activity, nutrition, etc.) must also be taken into account in connection with holistic evaluation of an athlete's training stress.

It should be noted that monitoring training on the basis of HR, with its delayed response at the beginning of a session of exercise, may underestimate the extent of high-intensity training and overestimate the time spent training in the threshold zone (Hogan et al., 2019, 2020). This is especially true in the case of very short high-intensity sessions (<30 s), in which HR_{max} may never be reached (Seiler, 2010; Buchheit and Laursen, 2013). Thus, it is highly likely that the time spent in Z3 during the CP observed here is an underestimation.

Furthermore, Hogan et al. (2019) recently highlighted the fact that during sessions of endurance training, analysis on the basis of HR indicates that less time is spent at <LT₂ and more time at ≥LT₂ than indicated by measurement of power. This difference reflects the cardiovascular drift associated with prolonged exercise of mild-to-moderate intensity, a drift observed earlier in connection with other endurance activities as well (Achten and Jeukendrup, 2003; Vogt et al., 2006; Nimmerichter et al., 2011). Thus, during PP1 it is most likely that the proportion of Z1 was underestimated, while the proportion of Z3 overestimated here. In the future, these problems associated with the use of HR as a measure of intensity should be recognized and additional external measures of training intensity, such as speed or power, included. Unfortunately, this was not possible to do in the present study.

According to the coaches of our athletes, their overall approach to training was not altered significantly by the restrictions introduced to combat the COVID-19 pandemic. However, these coaches did report some restrictions of access to gyms, which resulted in fewer high-load sessions of resistance training by some of the athletes. Furthermore, cancellation of all national competitions (with the exception of the German national championships) may have led to changes in the structure of training, especially during the period of competition.

CONCLUSION

Our seasonal analysis revealed extensive interindividual variation. Over the entire period of observation TID was pyramidal and all parameters related to performance improved. During PP2, when the COVID-19 lockdown was in place, the

REFERENCES

- Achten, J., and Jeukendrup, A. E. (2003). Heart rate monitoring. *Sports Med.* 33, 517–538. doi: 10.2165/00007256-200333070-00004
- Bakdash, J. Z., and Marusich, L. R. (2017). Repeated measures correlation. *Front. Psychol.* 8:456. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00456
- Baldassarre, R., Bonifazi, M., Meeusen, R., and Piacentini, M. F. (2019). The road to rio: a brief report of training-load distribution of open-water swimmers during the olympic season. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 14, 260–264. doi: 10.1123/ijspp.2017-0845
- Bellinger, P., Arnold, B., and Minahan, C. (2020). Quantifying the training-intensity distribution in middle-distance runners: the influence of different methods of training-intensity quantification. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 15, 319–323. doi: 10.1123/ijspp.2019-0298

proportion of time spent in Z3 doubled, while that spent in Z1 was lowered; the total time spent training on water increased; these changes may have accentuated the improvement in performance during this period. A further increase in total on-water training time during CP was made possible by reductions in the proportions of time spent in Z2 and Z3, so that more fractions of time was spent in Z1.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The original contributions presented in the study are included in the article/supplementary materials, further inquiries can be directed to the corresponding author/s.

ETHICS STATEMENT

The studies involving human participants were reviewed and approved by Julius Maximilians University Würzburg. Written informed consent to participate in this study was provided by the participants and/or the participants' legal guardian/next of kin.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

MM, BS, and CZ: conceptualization and investigation. MM, RL, BS, CZ, and H-CH: data analysis. MM, BS, CZ, and H-CH: writing, review, and editing of manuscript. All authors contributed to the article and approved the submitted version.

FUNDING

This project was supported financially by the German Federal Institute of Sports Sciences.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank all of the athletes and coaches involved for their cooperation and for the time they dedicated to this study.

- Billat, V., Demarle, A., Slawinski, J., Paiva, M., and Koralsztejn, J. (2001). Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33, 2089–2097. doi: 10.1097/00005768-200112000-00018
- Billat, V., Faina, M., Sardella, F., Marini, C., Fanton, F., Lupo, S., et al. (1996). A comparison of time to exhaustion at VO₂ max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics* 39, 267–277.
- Billat, V., Lepretre, P., Heugas, A., Laurence, M., Salim, D., and Koralsztejn, J. (2003). Training and bioenergetic characteristics in elite male and female Kenyan runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 35, 297–304; discussion 305–306.
- Bonetti, D. L., and Hopkins, W. G. (2010). Variation in performance times of elite flat-water canoeists from race to race. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 5, 210–217. doi: 10.1249/01.MSS.0000053556.59992.A9
- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand. J. Rehabil. Med.* 2, 92–98.

- Bourgois, J., Bourgois, G., and Boone, J. (2019). Perspectives and determinants for training-intensity distribution in elite endurance athletes. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 14, 1151–1156. doi: 10.1123/ijsp.2018-0722
- Bourgois, J., Steyaert, A., and Boone, J. (2014). Physiological and anthropometric progression in an international oarsman: a 15-year case study. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 9, 723–726. doi: 10.1123/ijsp.2013-0267
- Buchheit, M., and Laursen, P. B. (2013). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: Part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med.* 43, 313–338. doi: 10.1007/s40279-013-0029-x
- Calbet, J. L., Holmberg, H.-C., Rosdahl, H., van Hall, G., Jensen-Urstad, M., et al. (2005). Why do arms extract less oxygen than legs during exercise? *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 289, R1448–R1458. doi: 10.1152/ajpregu.00824.2004
- Carrasco Páez, L., Martínez Díaz, I. C., Hoyo Lora, M., del Sañudo Corrales, F., de B., and Ochiana, N. (2010). Ergometric testing for top-level kayakers: Validity and reliability of a discontinuous graded exercise test. *Kinesiology Slovenica* 16, 16–20. Available online at: <https://www.proquest.com/openview/d8a23ec9783b8a81d9a7b6fd5462a4b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=666319>
- Chéilleachair, N. J. N., Harrison, A. J., and Warrington, G. D. (2017). HIIT enhances endurance performance and aerobic characteristics more than high-volume training in trained rowers. *J. Sports Sci.* 35, 1052–1058. doi: 10.1080/02640414.2016.1209539
- Driller, M. W., Fell, J. W., Gregory, J. R., Shing, C. M., and Williams, A. D. (2009). The effects of high-intensity interval training in well-trained rowers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 4, 110–121. doi: 10.1123/ijsp.4.1.110
- Esteve-Lanao, J., Foster, C., Seiler, S., and Lucia, A. (2007). Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *J. Strength Condition. Res.* 21, 943–949. doi: 10.1519/R-19725.1
- Esteve-Lanao, J., Moreno-Pérez, D., Cardona, C. A., Larumbe-Zabala, E., Muñoz, L., Sellés, S., et al. (2017). Is marathon training harder than the ironman training? An ECO-method comparison. *Front. Physiol.* 8:298. doi: 10.3389/fphys.2017.00298
- Esteve-Lanao, J., San Juan, A. F., Earnest, C. P., Foster, C., and Lucia, A. (2005). How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37, 496–504. doi: 10.1249/01.mss.0000155393.78744.86
- Faude, O., Kindermann, W., and Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: How valid are they? *Sports Med.* 39, 469–490. doi: 10.2165/00007256-200939060-00003
- García-Pallarés, J., García-Fernández, M., Sánchez-Medina, L., and Izquierdo, M. (2010). Performance changes in world-class kayakers following two different training periodization models. *Eur. J. Appl. Physiol.* 110, 99–107. doi: 10.1007/s00421-010-1484-9
- García-Pallarés, J., Sánchez-Medina, L., Carrasco, L., Díaz, A., and Izquierdo, M. (2009). Endurance and neuromuscular changes in world-class level kayakers during a periodized training cycle. *Eur. J. Appl. Physiol.* 106, 629–638. doi: 10.1007/s00421-009-1061-2
- Gejl, K. D., Hvid, L. G., Andersson, E. P., Jensen, R., Holmberg, H.-C., and Ortenblad, N. (2021). Contractile properties of MHC I and II Fibers from highly trained arm and leg muscles of cross-country skiers. *Front. Physiol.* 12:855. doi: 10.3389/fphys.2021.682943
- Guellich, A., Seiler, S., and Emrich, E. (2009). Training methods and intensity distribution of young world-class rowers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 4, 448–460. doi: 10.1123/ijsp.4.4.448
- Hartmann, U., Mader, A., and Hollmann, W. (1990). Heart rate and lactate during endurance training programs in rowing and its relation to the duration of exercise by top elite rowers. *FISA Coach* 1, 1–4.
- Helge, J. W. (2010). Arm and leg substrate utilization and muscle adaptation after prolonged low-intensity training. *Acta Physiol.* 199, 519–528. doi: 10.1111/j.1748-1716.2010.02123.x
- Hogan, C., Binnie, M. J., Doyle, M., Lester, L., and Peeling, P. (2019). Comparison of training monitoring and prescription methods in sprint kayaking. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 15, 654–662. doi: 10.1123/ijsp.2019-0190
- Hogan, C., Binnie, M. J., Doyle, M., Lester, L., and Peeling, P. (2020). Heart rate and stroke rate misrepresent supramaximal sprint kayak training as quantified by power. *Eur. J. Sport Sci.* 0, 1–10. doi: 10.1080/17461391.2020.1771430
- Hopkins, W. G. (2002). *New View of Statistics: Effect Magnitudes*. Available online at: <http://www.sports-ci.org/resource/stats/effectmag.html> (accessed October 23, 2021).
- Ingham, S. A., Carter, H., Whyte, G. P., and Doust, J. H. (2008). Physiological and performance effects of low- versus mixed-intensity rowing training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 40, 579–584. doi: 10.1249/MSS.0b013e31815ecc6a
- Kenneally, M., Casado, A., Gomez-Ezeiza, J., and Santos-Concejero, J. (2020). Training intensity distribution analysis by race pace vs. physiological approach in world-class middle- and long-distance runners. *Eur. J. Sport Sci.* 0, 1–8. doi: 10.1080/17461391.2020.1773934
- Kiely, J. (2018). Periodization theory: confronting an inconvenient truth. *Sports Med.* 48, 753–764. doi: 10.1007/s40279-017-0823-y
- Lucía, A., Hoyos, J., Pardo, J., and Chicharro, J. L. (2000). Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: a longitudinal study. *Jpn. J. Physiol.* 50, 381–388. doi: 10.2170/jphysiol.50.381
- Matzka, M., Zinner, C., Kunz, P., Holmberg, H.-C., and Sperlich, B. (2021). Comparison of physiological parameters during on-water and ergometer kayaking and their relationship to performance in sprint kayak competitions. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 1, 1–7. doi: 10.1123/ijsp.2019-0912
- Mujika, I., Chatard, J. C., Busso, T., Geysant, A., Barale, F., and Lacoste, L. (1995). Effects of training on performance in competitive swimming. *Can. J. Appl. Physiol.* 20, 395–406. doi: 10.1139/h95-031
- Neal, C. M., Hunter, A. M., Brennan, L., O'Sullivan, A., Hamilton, D. L., DeVito, G., et al. (2013). Six weeks of a polarized training-intensity distribution leads to greater physiological and performance adaptations than a threshold model in trained cyclists. *J. Appl. Physiol.* 114, 461–471. doi: 10.1152/jappphysiol.00652.2012
- Neal, C. M., Hunter, A. M., and Galloway, S. D. R. (2011). A 6-month analysis of training-intensity distribution and physiological adaptation in Ironman triathletes. *J. Sports Sci.* 29, 1515–1523. doi: 10.1080/02640414.2011.596217
- Nimmerichter, A., Eston, R. G., Bachl, N., and Williams, C. (2011). Longitudinal monitoring of power output and heart rate profiles in elite cyclists. *J. Sports Sci.* 29, 831–839. doi: 10.1080/02640414.2011.561869
- Nybo, L., Schmidt, J. F., Fritzdorf, S., and Nordsborg, N. B. (2014). Physiological characteristics of an aging olympic athlete. *Med. Sci. Sports Exerc.* 46, 2132–2138. doi: 10.1249/MSS.0000000000000331
- Ortenblad, N., Nielsen, J., Boushel, R., Söderlund, K., Saltin, B., and Holmberg, H.-C. (2018). The muscle fiber profiles, mitochondrial content, and enzyme activities of the exceptionally well-trained arm and leg muscles of elite cross-country skiers. *Front. Physiol.* 9:1031. doi: 10.3389/fphys.2018.01031
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., and Buchheit, M. (2014). Heart-rate variability and training-intensity distribution in elite rowers. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 9, 1026–1032. doi: 10.1123/ijsp.2013-0497
- Robinson, D. M., Robinson, S. M., Hume, P. A., and Hopkins, W. G. (1991). Training intensity of elite male distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23, 1078–1082.
- Sandbakk, Ø., Haugen, T., and Ettema, G. (2021). The influence of exercise modality on training load management. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 16, 605–608. doi: 10.1123/ijsp.2021-0022
- Sandbakk, Ø., Holmberg, H.-C., Leirdal, S., and Ettema, G. (2011). The physiology of world-class sprint skiers. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 21, e9–e16. doi: 10.1111/j.1600-0838.2010.01117.x
- Schmitt, L., Bouthiaux, S., and Millet, G. P. (2020). Eleven years' monitoring of the world's most successful male biathlete of the last decade. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 2020, 1–6. doi: 10.1123/ijsp.2020-0148
- Schumacher, Y. O., and Mueller, P. (2002). The 4000-m team pursuit cycling world record: Theoretical and practical aspects. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34, 1029–1036. doi: 10.1097/00005768-200206000-00020
- Seiler, S. (2010). What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes? *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 5, 276–291.
- Seiler, S., and Kjerland, G. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: Is there evidence for an “optimal” distribution? *Scand. J. Med. Sci. Sports* 16, 49–56. doi: 10.1111/j.1600-0838.2004.00418.x
- Solli, G. S., Tønnessen, E., and Sandbakk, Ø. (2017). The training characteristics of the world's most successful female cross-country skier. *Front. Physiol.* 8:1069. doi: 10.3389/fphys.2017.01069
- Sperlich, B., and Holmberg, H.-C. (2017). The responses of elite athletes to exercise: an all-day, 24-h integrative view is required! *Front. Physiol.* 8:564. doi: 10.3389/fphys.2017.00564
- Steinacker, J. M., Lormes, W., Lehmann, M., and Altenburg, D. (1998). Training of rowers before world championships. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30, 1158–1163.

- Stöggli, T., and Sperlich, B. (2015). The training intensity distribution among well-trained and elite endurance athletes. *Front. Physiol.* 6:295. doi: 10.3389/fphys.2015.00295
- Tønnessen, E., Sylta, Ø., Haugen, T. A., Hem, E., Svendsen, I. S., and Seiler, S. (2014). The road to gold: training and peaking characteristics in the year prior to a gold medal endurance performance. *PLoS ONE* 9:e101796. doi: 10.1371/journal.pone.0101796
- Torvik, P.-Ø., Solli, G. S., and Sandbakk, Ø. (2021). The training characteristics of world-class male long-distance cross-country skiers. *Front. Sports Active Liv.* 3:20. doi: 10.3389/fspor.2021.641389
- Treff, G., Winkert, K., Sareban, M., Steinacker, J. M., Becker, M., and Sperlich, B. (2017). Eleven-week preparation involving polarized intensity distribution is not superior to pyramidal distribution in national elite rowers. *Front. Physiol.* 8:515. doi: 10.3389/fphys.2017.00515
- Treff, G., Winkert, K., Sareban, M., Steinacker, J. M., and Sperlich, B. (2019). The polarization-index: a simple calculation to distinguish polarized from non-polarized training intensity distributions. *Front. Physiol.* 10:707. doi: 10.3389/fphys.2019.00707
- Uali, I., Herrero, A. J., Garatachea, N., Marin, P. J., Alvear-Ordenez, I., and García-López, D. (2012). Maximal strength on different resistance training rowing exercises predicts start phase performance in elite kayakers. *J. Strength Condition. Res.* 26, 941–946. doi: 10.1519/JSC.0b013e31822e58f8
- van Hall, G., Jensen-Urstad, M., Rosdahl, H., Holmberg, H.-C., Saltin, B., Calbet, J., et al. (2003). Leg and arm lactate and substrate kinetics during exercise. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 284, E193–E205. doi: 10.1152/ajpendo.00273.2002
- Vogt, S., Heinrich, L., Schumacher, Y. O., Blum, A., Roecker, K., Dickhuth, H.-H., et al. (2006). Power output during stage racing in professional road cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38, 147–151. doi: 10.1249/01.mss.0000183196.63081.6a
- Watson, A. M. (2017). Sleep and athletic performance. *Curr. Sports Med. Rep.* 16, 413–418. doi: 10.1249/JSR.00000000000000418
- Winchcombe, C. E., Binnie, M. J., Doyle, M. M., Hogan, C., and Peeling, P. (2019). Development of an on-water graded exercise test for flat-water sprint kayak athletes. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 14, 1–21. doi: 10.1123/ijspp.2018-0717
- Zapico, A. G., Calderón, F. J., Benito, P. J., González, C. B., Parisi, A., Pigozzi, F., et al. (2007). Evolution of physiological and haematological parameters with training load in elite male road cyclists: a longitudinal study. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 47, 191–196.
- Zinner, C., Matzka, M., Leppich, R., Kounev, S., Holmberg, H.-C., and Sperlich, B. (2020). The impact of the German strategy for containment of coronavirus SARS-CoV-2 on training characteristics, physical activity and sleep of highly trained kayakers and canoeists: a retrospective observational study. *Front. Sports Active Liv.* 2:579830. doi: 10.3389/fspor.2020.579830
- Zinner, C., Morales-Alamo, D., Ørtenblad, N., Larsen, F. J., Schiffer, T. A., Willis, S. J., et al. (2016). The physiological mechanisms of performance enhancement with sprint interval training differ between the upper and lower extremities in humans. *Front. Physiol.* 7:426. doi: 10.3389/fphys.2016.00426
- Zinner, C., Schäfer Olstad, D., and Sperlich, B. (2018). Mesocycles with different training intensity distribution in recreational runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 50, 1641–1648. doi: 10.1249/MSS.00000000000001599

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 Matzka, Leppich, Holmberg, Sperlich and Zinner. 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.

c. Studie 3

Matzka M, Leppich R, Sperlich B, Zinner C. Retrospective Analysis of Training Intensity Distribution Based on Race Pace Versus Physiological Benchmarks in Highly Trained Sprint Kayakers. *Sports Med Open*. 2022 Jan 6;8(1):1. doi: 10.1186/s40798-021-00382-y. PMID: 34989918.

ORIGINAL RESEARCH ARTICLE

Open Access



Retrospective Analysis of Training Intensity Distribution Based on Race Pace Versus Physiological Benchmarks in Highly Trained Sprint Kayakers

Manuel Matzka¹, Robert Leppich², Billy Sperlich^{1*} and Christoph Zinner³

Abstract

Background: Research results on the training intensity distribution (TID) in endurance athletes are equivocal. This non-uniformity appears to be partially founded in the different quantification methods that are implemented. So far, TID research has solely focused on sports involving the lower-body muscles as prime movers (e.g. running). Sprint kayaking imposes high demands on the upper-body endurance capacity of the athlete. As there are structural and physiological differences between upper- and lower-body musculature, TID in kayaking should be different to lower-body dominant sports. Therefore, we aimed to compare the training intensity distribution during an 8-wk macrocycle in a group of highly trained sprint kayakers employing three different methods of training intensity quantification.

Methods: Heart rate (HR) and velocity during on-water training of nine highly trained German sprint kayakers were recorded during the final 8 weeks of a competition period leading to the national championships. The fractional analysis of TID was based on three zones (Z) derived from either HR (TID_{Bla-HR}) or velocity (TID_{Bla-V}) based on blood lactate (B_{la}) concentrations ($Z1 \leq 2.5 \text{ mmol L}^{-1} B_{la}$, $Z2 = 2.5\text{--}4.0 \text{ mmol L}^{-1} B_{la}$, $Z3 \geq 4.0 \text{ mmol L}^{-1} B_{la}$) of an incremental test or the 1000-m race pace (TID_{Race}): $Z1 \leq 85\%$ of race pace, $Z2 = 86\text{--}95\%$ and $Z3 \geq 95\%$.

Results: TID_{Bla-V} ($Z1: 68\%$, $Z2: 14\%$, $Z3: 18\%$) differed from TID_{Bla-HR} ($Z1: 91\%$, $Z2: 6\%$, $Z3: 3\%$) in each zone (all $p < 0.01$). TID_{Race} ($Z1: 73\%$, $Z2: 20\%$, $Z3: 7\%$) differed to $Z3$ in TID_{Bla-V} ($p < 0.01$) and all three TID_{Bla-HR} zones (all $p < 0.01$). Individual analysis revealed ranges of $Z1$, $Z2$, $Z3$ fractions for TID_{Bla-HR} of 85–98%, 2–11% and 0.1–6%. For TID_{Bla-V} , the individual ranges were 41–82% ($Z1$), 6–30% ($Z2$) and 8–30% ($Z3$) and for TID_{Race} 64–81% ($Z1$), 14–29% ($Z2$) and 4–10% ($Z3$).

Conclusion: The results show that the method of training intensity quantification substantially affects the fraction of TID in well-trained sprint kayakers. TID_{Race} determination shows low interindividual variation compared to the physiologically based TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} . Depending on the aim of the analysis TID_{Race} , TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} have advantages as well as drawbacks and may be implemented in conjunction to maximize adaptation.

Keywords: Endurance training, Sprint kayaking, Training zones, Polarized training, Pyramidal training, Upper-body sport

Key Points

- TID_{Bla-HR} reveals a pyramidal TID for $Z1$, $Z2$ and $Z3$ ($91 \pm 4\%$, $6 \pm 2\%$, $3 \pm 2\%$), whereas TID_{Bla-V} showed a TID with a tendency towards a polarized TID ($68 \pm 14\%$, $14 \pm 8\%$ and $18 \pm 8\%$).

*Correspondence: billy.sperlich@uni-wuerzburg.de

¹ Integrative and Experimental Exercise Science and Training, University of Würzburg, Würzburg, Germany

Full list of author information is available at the end of the article



© The Author(s) 2021. **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

- Based on the present data, a combination of both TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} may yield value for TID quantification in kayak sprinting with TID_{Bla-HR} implemented to determine Z1 and Z2 and TID_{Bla-V} for Z3.
- The analysis of TID_{Race} showed a pyramidal TID pattern (Z1: $73 \pm 5\%$, Z2: $20 \pm 5\%$, Z3: $7 \pm 2\%$) on the group level.
- The most noticeable difference between the TID determination methods is the comparably low inter-individual variation in TID for TID_{Race} .

Introduction

Endurance athletes structure their training intensity usually based on different intensity zone models [1–4]. Most commonly, a three-zone model is implemented to distinguish the distribution of training between low, moderate and high intensities. The zones are generally determined based on physiological parameters (e.g. maximum oxygen uptake [VO_{2max}], blood lactate [B_{la}]) established from incremental testing. Zone (Z) 1 defines intensities below the aerobic threshold ($< 2.5 \text{ mmol L}^{-1} B_{la}$ or $\leq 80\%$ of VO_{2max}), Z2 relates to intensities between aerobic and anaerobic threshold ($2.5\text{--}4.0 \text{ mmol L}^{-1} B_{la}$ or $81\text{--}87\%$ of VO_{2max}) and Z3 equals intensities above the anaerobic threshold ($> 4.0 \text{ mmol L}^{-1} B_{la}$ or $\geq 88\%$ of VO_{2max}) [5]. Different internal (e.g. heart rate [HR], VO_2 , blood lactate) and/or external (e.g. velocity, power output) parameters are continuously monitored to quantify these intensity zones during daily training.

Besides the consensus in research regarding the physiologically based zone demarcation, different TIDs have been found in endurance athletes. Currently, the debate about the superiority of a distinct TID model appears to focus on two models that were mostly found to be implemented by elite endurance athletes [4]: (i) The polarized TID consists of high volumes in Z1 and Z3, with only small proportions in Z2. Proportion of Z1 is generally higher than Z3 and proportion of Z3 is always higher than Z2. (ii) The pyramidal TID is characterized by high volumes of Z1 and gradually decreasing percentages in Z2 and Z3.

To date, research fails to give a clear answer, as to whether one of these TID models is superior. This non-uniformity appears to be partially founded in the different quantification methods that are implemented [6]. For example, a comparison of heart rate and velocity-based measures of TID in elite middle- and long-distance runners during an 8-week general preparation phase found a polarized TID when training was quantified by running speed (Z1: $79.9\% \pm 7.3\%$, Z2: $5.3\% \pm 4.9\%$, Z3: $14.7\% \pm 7.3\%$; Polarization-Index [Pol-Index]: 2.3 a.u.) and a pyramidal structured TID (Z1: $79.6\% \pm 7.2\%$, Z2:

$17.0\% \pm 6.3\%$, Z3: $3.4\% \pm 2.0\%$; Pol-Index: 1.2 a.u.) when the training zones were quantified on HR [7].

Kenneally et al. recently created a novel way to determine endurance intensity zones in middle- and long-distance running based on the relative intensity of the athletes' competition performance (percentage of race pace) [7, 8]. This new method is based on the fact, that previous research on the effects of different endurance training TID mainly analysed changes in physiological variables or time trial performances rather than actual competition performance, as the main aim of training. However, competition performance is influenced by multiple internal (e.g. central nervous system, biomechanics, cardiopulmonary system, etc.) and external factors (environment, tactics, etc.) and cannot be solely described by physiological variables [7]. In order to develop certain physiological systems (e.g. oxygen uptake, lactate threshold, exercise economy) it is well known that time spent in certain physiologically based intensity zones induce specific adaptation related to each zone [9]. Nevertheless, physiologically based intensity zones may be of limited value especially when training periods aim to specifically fine-tune the development of competition performance. Therefore, the race pace the race pace may serve as a better reference point to prescribe and analyse training intensity. The race pace-based approach aims to take different performance determinants of the competition performance into account [7], however this approach has its flaws as well. For example the TID of middle- and long-distance runners show markedly less interindividual differences when analysed based on race pace compared to TID analysis based on physiological benchmarks [7].

In contrast to endurance running, sprint kayaking imposes high demands on the upper-body endurance capacity of the athlete, as the athlete propels the boat-body-system against water resistance involving his/her relatively small upper-body muscles [10]. Differences in muscle mass, muscle fibre spectrum, oxygen extraction [11] as well as glucose and lipid oxidative capacity [11–13] between upper and lower body require different qualitative and quantitative training stimuli for distinct adaptation. From this perspective, the TID in kayak sprinting when compared to other leg-dominated sports should be different. Additionally, opposed to Olympic running-events with relatively high similarity of the courses, sports like kayak sprinting that are far more influenced by course characteristics (e.g. lake vs. artificial regatta course) and environmental factors (e.g. waves and water temperature) may not have the same potential to incorporate race pace-based velocity measures as a valuable tool for TID analysis [8].

So far, no study compared an internal and an external parameter-based method for determining TID over the

course of a training cycle in kayak sprinting. Furthermore, no investigation implemented a race pace-based approach for TID analysis. Therefore, the current study aimed to retrospectively compare different TID quantification methods based on physiologically determined intensity zones using heart rate and velocity monitoring as well as race pace-based zone determination using velocity monitoring during an 8-week competition period in highly trained kayak sprint athletes.

Materials and Methods

Experimental Design

This retrospective observational study was part of a 1-year study-project and took place during the season 2020. The present data were collected from June until August 2020. The observation comprised the final 8 weeks of the competition period before the German national championships which took place the week after data collection ended. Figure 1 illustrates the time course, methods involved and parameters obtained during the study period.

Participants

The nine athletes were recruited from two different official performance headquarters of the German and/or North Rhine-Westphalian Canoe Federation. The key

anthropometric, physiological and performance characteristics of the flatwater sprint kayakers are summarized in Table 1.

Four of the nine participants were members of the German Development Team and five were part of the Western German Regional Team. All participants competed on the highest national level in Germany. The athletes competed in kayaking for at least 6 years.

All were familiar with all testing procedures employed, having experienced frequent testing throughout their career. All procedures were approved by the institute's ethics committee and conducted in accordance with the Declaration of Helsinki. After being informed in detail about the risks, benefits and procedures, all participants and their legal guardians gave their written consent to participate in this study.

Determination of Intensity Zones

The HR (TID_{Bla-HR}) and velocity (TID_{Bla-V}) zones were based on the HR and velocity corresponding to certain blood lactate levels obtained from the incremental step test. The zones for TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} were established based on the results of an incremental step test performed before the 8-week macrocycle. HR and velocity for each zone were based on previous categorization [5] with Z1 as HR and velocity corresponding to >60%

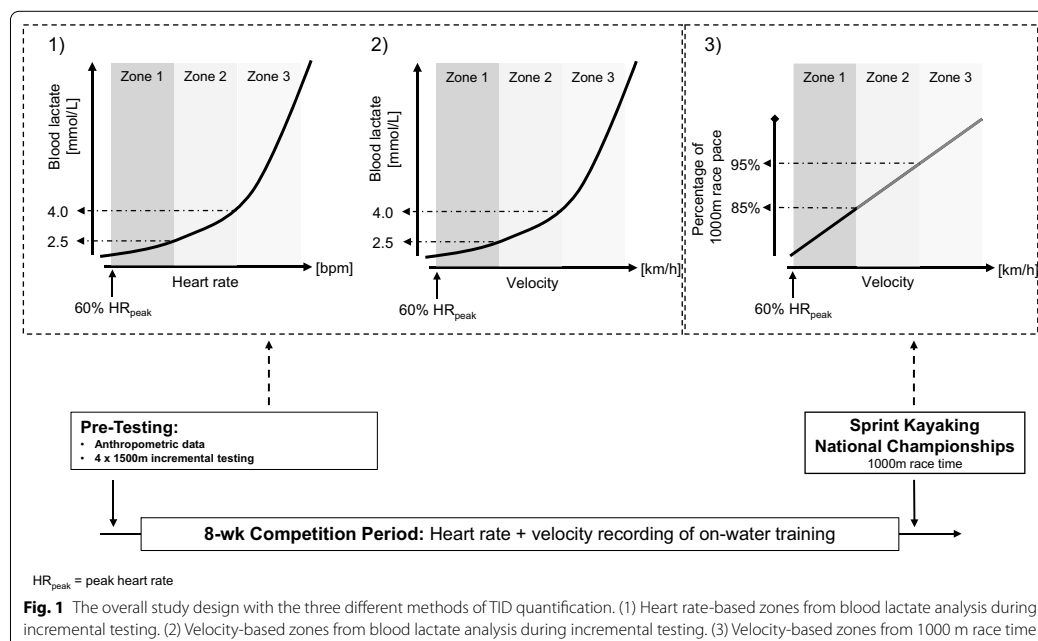


Fig. 1 The overall study design with the three different methods of TID quantification. (1) Heart rate-based zones from blood lactate analysis during incremental testing. (2) Velocity-based zones from blood lactate analysis during incremental testing. (3) Velocity-based zones from 1000 m race time

Table 1 Participants' characteristics

P-ID	Sex	Age (years)	Height (cm)	Body Mass (kg)	Body Mass Index (kg/m ²)	Peak oxygen uptake (ml/min)	Best times at Sprint Kayaking National Championships (s)		
							200 m	500 m	1000 m
1	Male	17	182	82.5	24.9	5275	<38.3	<105.1	<224.1
2	Male	18	195	87.3	23.0	5347	<40.1	<105.6	<225.6
3	Male	23	179	73.8	23.0	5209	n.d	<105.8	<222.2
4	Male	16	180	73.2	22.6	4137	n.d	<107.1	<230.4
5	Female	15	167	63.2	22.7	2714	n.d	<124.4	<257.2
6	Female	17	174	75.5	24.9	3068	<47.2	<123.6	<264.9
7	Female	17	170	66.0	22.8	2931	<42.9	<119.3	<261.7
8	Female	16	177	74.8	23.9	3330	<44.2	<121.7	<257.9
9	Female	17	166	68.0	24.7	3038	<46.8	<124.2	<265.9
Mean		17.3	177	73.8	23.6	3894	43.0	115.1	245.5
SD		2.3	9	7.7	1.0	1110	4.0	9.0	19.3

peak HR (HR_{peak}) to HR at 2.5 mmol L⁻¹ blood lactate; Z2 with HR and velocity corresponding to 2.5–4.0 mmol L⁻¹ blood lactate and Z3 as an intensity with HR and velocity corresponding above 4.0 mmol L⁻¹ blood lactate. The 2.5 and 4 mmol L⁻¹ reference points refer to training zone prescriptions of the German Canoe Federation [14].

The TID based on race pace was also based on a three-zone model and based on previous categorization [7, 8] with Z1 as velocity corresponding from 60% HR_{peak} to 85% of race pace, Z2 as velocity corresponding from 86 to 95% of race pace and Z3 as velocity corresponding above 95% of race pace. These zone demarcations correspond to training recommendations by the Germany Canoe Federation for the three zones [14].

Polarization-Index

To quantify the individual level of polarization, we calculated a Polarization-Index (Pol-Index; a.u.) based on the time trained in each intensity zone. The Pol-Index was calculated as described in detail previously [15, 16] and calculated as follows:

$$\text{Polarization-Index (a.u.)} = \log_{10}(Z1/Z2 * Z3 * 100). \quad (1)$$

A Pol-Index of >2.0 a.u. is proposed to reflect a polarized TID.

Incremental Testing

All on-water testing took place on the regatta course in Duisburg-Wedau (Germany), the venue for several international canoe sprint championships, as well as the World Cup series of the International Canoe Federation (ICF). The participants were asked to refrain from all physical exercise for 12 h and exhausting exercise for 48 h

prior to the experimental sessions, as well as to maintain their regular diet. In addition, all were instructed to avoid food intake 2 h prior to testing and were requested to arrive in a well hydrated state. Their diet and state of hydration were assessed with pre-test questionnaires.

The incremental test protocol involved 4 × 1500-m trials on-water at different intensities (i.e. 70%, 80% and 90% of HR_{peak} , as well as an all-out effort) as described in detail previously [17]. Each incremental step was performed with a turn at 750 m to weaken the influence of wind and waves on performance. The time for each change in direction was extracted using the GPS-data. Previous investigations involving on-water incremental step testing in sprint kayakers showed acceptable to excellent reliability and validity of measurements of HR, oxygen uptake, blood lactate and stroke rate [18, 19] and strong correlations with performance [17].

The HR utilized for the first test was based on HR_{peak} obtained 6 to 8 weeks before with the same incremental on-water test protocol by the Western German Canoe Federation and each following test utilized the maximal heart rate of the previous testing. The 30–45 s interval between successive steps was the time required to sample capillary blood from the earlobe. All participants received continuous visual feedback from their HR monitor (Polar Wear Link System and V800 HR Monitor, Polar Electro OY, Kempele, Finland) mounted directly in front of them and averaged every second. The highest value during each incremental test was considered as HR_{peak} . During each stage the stroke rate was self-selected.

Capillary blood was sampled from the right earlobe for analysis of lactate (Lactate Pro 2, Arkray KDK, Kyoto, Japan), at baseline and after each step. The HR and velocity associated with corresponding blood lactate

concentrations were determined by linear interpolation between the two closest points, as in previous studies [20]. At the same time-points, rating of perceived exertion (RPE) was assessed employing the 6–20-point Borg scale [21].

Heart Rate and Velocity Monitoring

The HR, velocity, distance and duration of every training session were collected from each sprint kayaker with a GPS-enabled watch (M430, Polar Electro Oy, Kempele, Finland) and the data were stored online (Polar Flow, Polar Electro Oy). To maximize measurement accuracy, HR was measured using a HR chest strap connected with the M430. All initiated the recording of each session with the beginning of the warm-up and stopped recording immediately with completion of cool-down. Afterwards, all datasets were visually checked for artefacts (e.g. flat-line). Incomplete data files due to technical issues (e.g. low battery, HR or GPS-inaccuracy, etc.) and excluded from further analysis. Additionally, an experienced coach compared the number of recorded sessions with the online training diary of each athlete. From the data provided by the online version of the HR monitor (Polar Flow software), the total time spent in each HR and velocity zone for each training session was calculated.

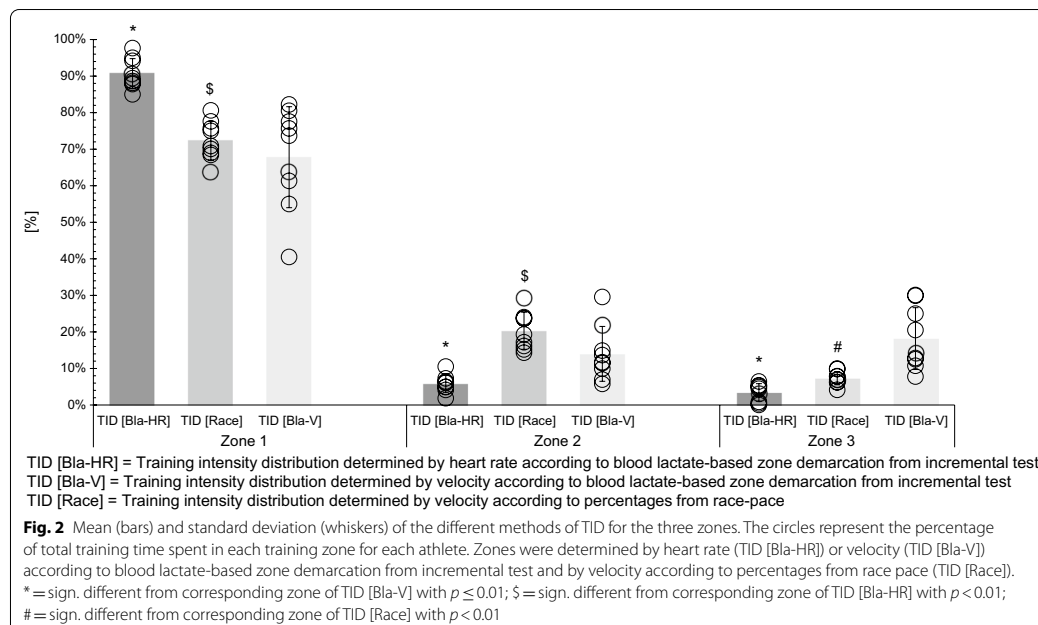
Statistics

SPSS Statistics (Version 26; IBM Corp., Armonk, NY) was utilized for all statistical analysis. As performed earlier [6] a two-way analysis of variance with Bonferroni post hoc test was implemented to analyse for differences between TIDs derived from HR and velocity based on blood lactate-based zone demarcation as well as velocity based on race pace-based zone demarcation. Statistical significance was defined as $p \leq 0.05$. Effect sizes were calculated as Cohen's d values (Cohen, 1988), where 0.00–0.41 represents a small, 0.41–0.70 a moderate and ≥ 0.70 a large effect. In addition, 95% confidence intervals (95% CI) for Cohen's d were calculated.

Results

During the 8-week observation period, 557 single sessions with approximately 4500 km or 500 h of training were incorporated for analysis. The average training time per week within this period was 13.3 ± 1.4 h, with 7.9 ± 1.2 h of kayak-specific on-water training, 5.2 ± 0.7 h strength training, 1.8 ± 0.7 h other endurance training (e.g. running, swimming, cycling) and 1.1 ± 0.5 h of other activities (e.g. stretching, yoga).

The mean TID for the three different methods in each training zone during the observation period is summarized in Fig. 2. Figure 3 displays the TID for each participant. Additionally, Fig. 4 shows the



Pol-Index for each participant and each TID determination method.

For TID_{Race} analysis, the mean velocity for the upper limit of Z1 and Z2 was $11.80 \pm 0.94 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ and $13.27 \pm 1.06 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively. For the TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} the upper limits were $12.37 \pm 0.80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (Z1) and $13.02 \pm 0.82 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (Z2). Mean HR for the upper limit of Z1 and Z2 for TID_{Bla-HR} was 173 ± 9 and 183 ± 10 beats per minute.

When employing TID_{Bla-HR} the mean plural of Z1, Z2 and Z3 were $91 \pm 4\%$, $6 \pm 2\%$ and $3 \pm 2\%$ (Pol-Index: 1.6 ± 0.4). For TID_{Bla-V} the fractions were $68 \pm 14\%$, $14 \pm 8\%$ and $18 \pm 8\%$ (Pol-Index: 1.9 ± 0.3), with each fraction differing to TID_{Bla-HR} (Z1: $p < 0.01$, $d = -2.23$, 95% CI -3.28 to -0.97 ; Z2: $p = 0.01$, $d = 1.37$, 95% CI 0.29 to 2.32 ; Z3: $p < 0.01$, $d = 2.57$, 95% CI 1.23 to 3.67). The Z1, Z2 and Z3 plural of TID_{Race} were $73 \pm 5\%$, $20 \pm 5\%$ and $7 \pm 2\%$ (Pol-Index: 1.4 ± 0.2), respectively. Z1 and Z2, but not Z3 of TID_{Race} zone fractions differed when compared to TID_{Bla-HR} (Z1: $p < 0.01$, $d = 4.20$, 95% CI 2.40 to 5.60 ; Z2: $p < 0.01$, $d = -3.68$, 95% CI -4.97 to -2.03) and compared to TID_{Bla-V} only Z3 was different ($p < 0.01$, $d = 1.89$, 95% CI 0.70 to 2.89).

On an individual level the ranges in each zone and with each TID determination method were as follows: For TID_{Bla-HR} Z1 to Z3 ranged from 85 to 98%, 2 to 11% and 0.1 to 6% (Pol-Index: 0.3–2.1), for TID_{Bla-V} 41 to 82%, 6 to 30%, 8 to 30% (Pol-Index: 1.6–2.4) and for TID_{Race} 64 to 81%, 14 to 29% and 4–10% (Pol-Index: 1.2–1.7), respectively. With TID_{Bla-HR} all but one of the athletes revealed a pyramidal TID (Pol-Index < 2.0) with extremely high fractions in Z1 ($> 85\%$), while only one athlete (P-ID 2) highlighted a polarized TID with a Pol-Index of 2.1 and only 2% difference between Z2 (4%) and Z3 (6%). With TID_{Bla-V} three athletes (P-ID 2, 5, 7) showed a polarized intensity distribution (Pol-Index ≥ 2.1) and two athletes revealed a polarized like TID pattern, i.e. higher proportions of Z3 than Z2, with one of the two (P-ID 6; Pol-Index = 1.9) revealing almost identical fractions for Z2 (11%) and Z3 (13%) and the other (P-ID 4; Pol-Index = 1.6) relatively low proportion in Z1 (55%). Additionally, one athlete (P-ID 9; Pol-Index: 1.6) with TID_{Bla-V} had an almost uniform distribution of the three zones with 40, 30 and 30% in Z1–Z3. TID_{Race} analysis shows a pyramidal distribution for each athlete.

Discussion

The current study aimed to retrospectively compare different TID quantification methods based on physiologically determined intensity zones using HR and velocity monitoring as well as race pace-based zone determination using velocity monitoring during an 8-week competition period in highly trained kayak sprint athletes. This retrospective analysis is to best of our knowledge the first observation in the literature comparing these different quantification methods for TID in kayak sprinting.

The major findings were:

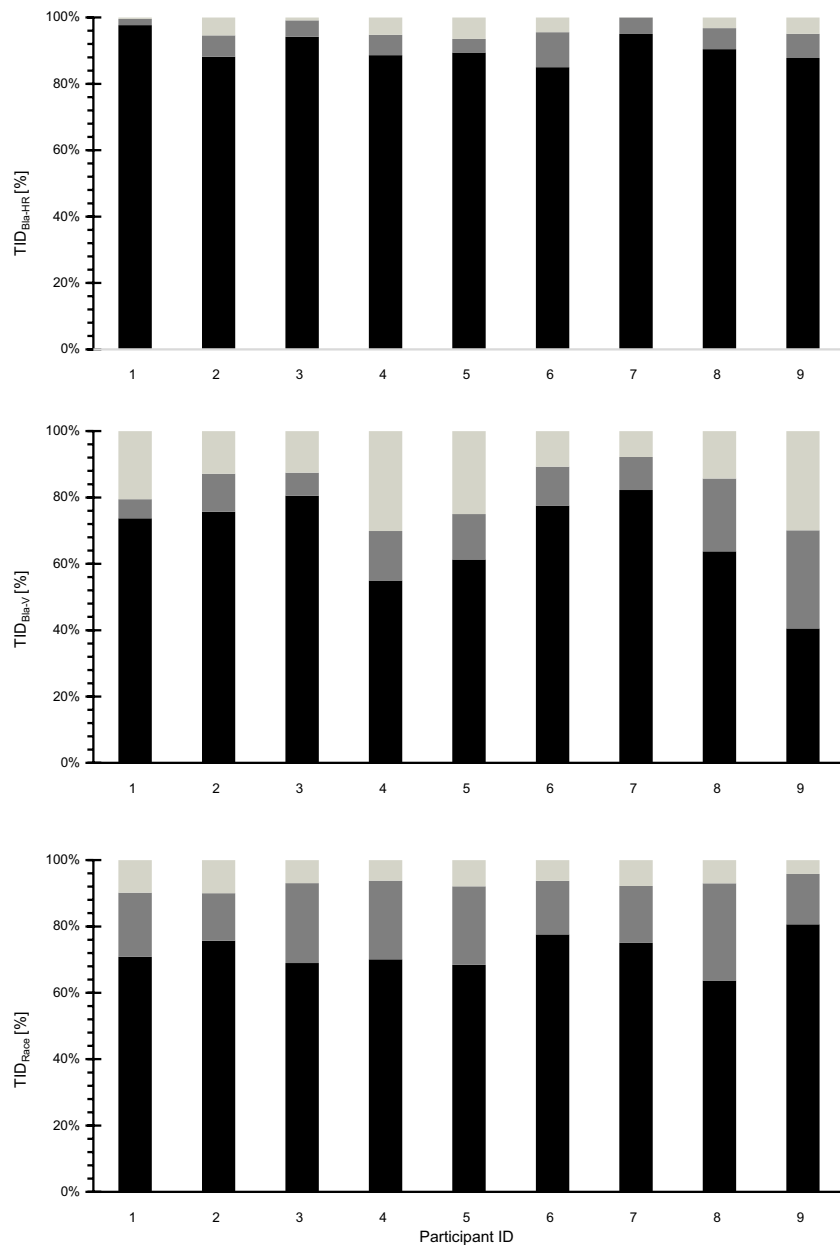
- (i) TID_{Bla-HR} significantly differed in each intensity zone from TID_{Bla-V} and in Z1 and Z2 from TID_{Race} .
- (ii) TID_{Bla-V} differed in Z3 fractions when compared TID_{Race} .
- (iii) Depending on the quantification method and on group level TID_{Bla-HR} and TID_{Race} yielded rather pyramidal TID whereas TID_{Bla-V} resulted in more polarized TID.
- (iv) On an individual level TID_{Race} was pyramidal for each athlete, TID_{Bla-HR} was pyramidal for eight athletes and polarized for one athlete and TID_{Bla-V} revealed to be polarized for three athletes, polarized like for two athletes, uniform for one and pyramidal for three athletes.

Intensity Distribution Based on TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V}

The fraction of each zone with TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} differed substantially. TID_{Bla-HR} revealing a pyramidal TID for Z1, Z2 and Z3 ($91 \pm 4\%$, $6 \pm 2\%$, $3 \pm 2\%$; Pol-Index: 1.6 ± 0.4), whereas TID_{Bla-V} showed a more polarized TID ($68 \pm 14\%$, $14 \pm 8\%$ and $18 \pm 8\%$; Pol-Index: 1.9 ± 0.3). Research concerning both TID quantifications methods is scarce, and so far, the only existing studies were implemented in running [6] and cycling [22], e.g. endurance sports that mainly implement the lower body for propulsion. In contrast, sprint kayaking imposes high demands on the endurance capacity of the athletes' upper body, as the athlete propels the boat-body-system against water resistance involving relatively small upper-body muscles [10]. Differences in muscle mass, muscle fibre spectrum, oxygen extraction [11] as well as glucose and lipid oxidative capacity [11–13] between upper and lower body require different qualitative and quantitative training stimuli for distinct adaptation. Recent studies in elite cross-country skiers investigated upper and lower-body muscles and found

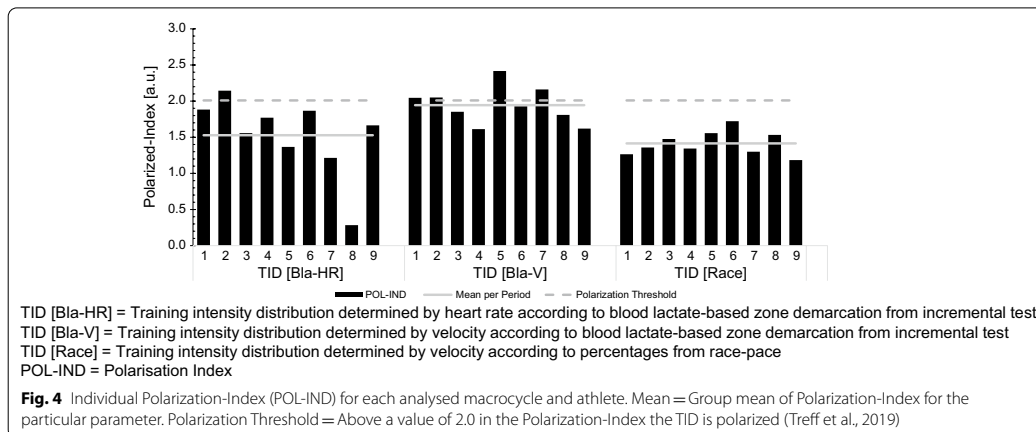
(See figure on next page.)

Fig. 3 Training intensity distribution (percentage of total training time spent in each training zone) for each participant where zones were determined by heart rate (TID_{Bla-HR}) or velocity (TID_{Bla-V}) according to physiological testing and by velocity according to percentages from race pace (TID_{Race})



TID [Bla-HR] = Training intensity distribution determined by heart rate according to blood lactate-based zone demarcation from incremental test
 TID [Bla-V] = Training intensity distribution determined by velocity according to blood lactate-based zone demarcation from incremental test
 TID [Race] = Training intensity distribution determined by velocity according to percentages from race-pace

Fig. 3 (See legend on previous page.)



upper-body muscles to be less capable to oxidize fat and to rely more on carbohydrate oxidation than lower-body muscles [11, 12]. Thus, it may seem plausible to assume that kayakers may not be able to perform as much volume in the higher intensity zones (Z2, Z3), as arm-glucose storages depleted earlier and therefore kayakers (have to) implement more time in Z1 compared to whole-body and/or lower-body sports.

Despite the differences in muscles involved in propulsion, data from endurance running [6] and endurance cycling [22] are partly in agreement with the current findings. Bellinger et al. analysed the TID based on HR and running speed corresponding to below first ventilatory threshold, between first and second ventilatory threshold and above second ventilatory threshold of fourteen highly trained middle-distance runners during an 8-wk training period [6]. In the latter investigation, TID differed especially in time spent in Z2 (HR: $17.0 \pm 6.3\%$ vs. speed: $5.3 \pm 4.9\%$) and Z3 (HR: $3.4 \pm 2.0\%$ vs. speed: $14.7 \pm 7.3\%$), resulting in a polarized TID for the velocity-based and a pyramidal TID for HR-based zone quantification. In line with the results of Bellinger and colleagues [6], another study [22] found higher fractions of Z3 for power output-based TID ($11.5 \pm 2.5\%$) quantification compared to HR-based TID quantification ($4.4 \pm 2.0\%$), when comparing a three-zone TID model based on aerobic and anaerobic threshold performance in road cyclists during a 10-week training period.

The differences in Z2 and Z3 between HR- and velocity/power-derived TID quantification shown in the previous studies [6, 22] and our findings between TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} are most likely attributable to the delayed HR-kinetics at the beginning of an (intense) exercise bout. Especially, with short high-intensity bouts (<30 s)

the HR response is inertial and does not reflect the entire 30-s effort [5, 23]. Thus, lower fractions of Z3 and higher fractions of Z2 with TID_{Bla-HR} are possible. As a consequence, TID analysis based on HR is likely impractical to reflect the neuromuscular demand of high-intensity short-duration efforts, while external measures such as velocity seem to reflect these demands more accurately [22, 23]. In fact, in training regimes of sprint kayaking short intervals with maximum intensity are frequently implemented as the (i) start phase performance has an important impact on race performance [10] and (ii) work performed during 30 s all-out kayaking is correlated with performance over all three Olympic distances [24] as reflected in the higher fractions of Z3 for velocity-based measures in the current study. The underestimation of Z3 by HR-monitoring is further confirmed by two recent studies [25, 26] investigating kayak sprinters and comparing post-session intensity analysis based on HR and power output. In this case, HR-based training monitoring also underestimated high-intensity training loads and overestimated training time in Z2. Accordingly, in phases with focus on lower intensities and longer distances covered in each exercise bout (e.g. general preparatory period) TID would differ less between HR and external measures compared to phases with more short high-intensity training sessions (e.g. competition and taper periods) [22].

In the present analysis quantification of Z1 markedly differed to the findings of previous studies [6, 22]. The current study shows significantly higher proportions of Z1 TID_{Bla-HR} compared to TID_{Bla-V} , while Bellinger et al. [6] and Sanders et al. [22] found no difference for Z1 fractions between HR and velocity monitoring. The following explanation may account for the inconsistent

data: kayakers often perform their long-distance endurance sessions in groups and usually one kayaker leads, and the training partners follow situated to the left and right side behind the leader and/or directly behind him/her [27]. This arrangement is called “wash-riding” as the kayakers behind the leader are assisted in their forward paddling by the force of the “wash” (i.e. undertow) generated by the boat of the leading kayaker. Previous analysis found that wash-riding saves up to 31.9% of energy, which is also associated with markedly decreased blood lactate and heart rate values during a constant endurance session [27]. As it is common for kayakers to change the group leader each kilometre or each 5 min, the position alterations allow the group to maintain a relatively high velocity over an entire session reflecting a Z2-velocity while keeping the HR low (i.e. Z1). Therefore, from a practical point of view, it is likely that Z1 contribution is underrated and Z2 contribution overrated when employing TID_{Bla-V} . Future studies on TID in kayaking should consider carefully, if the athletes should be allowed to perform wash-riding.

Consequently, when analysing training intensity in kayak sprinters, both quantification methods TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} may have crucial downsides for TID analysis and further decision making. Based on the present data, a combination of both methods may yield value for TID quantification in kayak sprinting with TID_{Bla-HR} implemented to determine Z1 and Z2 and TID_{Bla-V} for Z3. Further research is warranted in this regard.

In summary, previous retrospective TID_{Bla-HR} analysis seems to yield more pyramidal TID [3, 6, 28–33] whereas when integrating external measurement (e.g. velocity or power output) [6] or the session goal method [3, 34] with complemented HR measurement the TID reveals to be more polarized. This pattern of TID-dependence on the implemented quantification method applies over a range of different sports like running [6, 28], cycling [29, 31, 33], cross-country skiing [3], rowing [30].

Intensity Distribution Based on TID_{Race}

The analysis of TID_{Race} showed a pyramidal TID pattern on the group level. Most interestingly, this pattern was found consistently for each athlete (Fig. 3C). This high congruency among the group in TID was not evident with the other two quantification methods, i.e. TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} (Fig. 3A, B). Similarly, Kenneally et al. [7] concluded that TID is subject to less inter-individual variation among middle- and long-distance runners when employing race pace compared to the physiological benchmark-based TID quantification, probably because training during the competitive period targets mainly to develop race pace. In a review article, the same research group [8] analysed TID of different

middle- and long-distance runners employing either HR- or velocity-based TID and calculated training intensity zones relative to the targeted race pace and found race pace to be a more important factor in the design of training programmes than physiological zone demarcation and founded this in the high similarity between athletes TID when based on race pace.

However, it remains questionable if the consistency in TID_{Race} zone proportion among athletes favours argument for race pace-based zone quantification, as, e.g. so far, no study analysed coherences between race pace-based zone quantification and performance-related measures. Additionally, the TID_{Race} in our analysis resulted in a markedly wider speed range for Z2 ($1.47 \text{ km/h} \pm 0.12 \text{ km/h}$) when compared with the physiologically based TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} ($0.66 \text{ km/h} \pm 0.27 \text{ km/h}$), which is in accordance with previous research [7, 35] and most probably explains the higher homogeneity of TID_{Race} . The markedly wider speed range for Z2 in TID_{Race} explains the shift from higher fractions in Z3 and lower fractions in Z2 in the physiological approach to comparably higher fractions in Z2 and lower fractions in Z3 compared to the race pace approach, which was similarly found in middle- and long-distance runners [7]. The wide range of Z2 in the race pace approach certainly includes intensities that exceed the “threshold” zone and thus, possibly provides a wider range of training stimuli [7]. If coaches are not aware of the higher intensities included in Z2 when using the current approach of race pace-based training intensity prescription, the use of the method potentially may lead to an unintended overload. Although the TID_{Race} assists coaches and athletes with feedback about the training intensity relative to competition performance (and therefore representing a marker with high specificity especially in the final weeks prior to competitions), the TID analyses based on physiological zone demarcation is important to receive knowledge about the development of the different energy systems during the training process.

Furthermore, especially for the sport of sprint kayaking, TID_{Race} reveals several difficulties: (i) as an outdoor sport, kayaking race performance is strongly affected by weather conditions (e.g. water temperature, wind, waves, etc.) and type of waters (e.g. artificial regatta course, lake, river, etc.) where training and competition are performed, leading to substantial variation in performance times. This variation subjects a session-to-session as well as competition-to-competition comparison of speed sensitive to errors. Future research should provide recommendations for kayak-specific training intensity prescription/analysis which consider these variations. (ii) In kayaking it is quite common to train for and compete over, at least, two of the three Olympic distances (200 m,

500 m, 1000 m). This variation can lead to differing intensity prescriptions using race pace, which most probably is no issue within Z3 sessions, where the session aim is mostly specific to the race distance. However, during Z1 and Z2 sessions, the session aim must not be clearly assigned to a specific race distance. As, in the current study, race pace-based TID was solely based on 1000 m race pace, Z3 fractions would have been even lower in favour of Z2 if each sessions intensity would have been calculated on the race distance targeted in the individual session. For example, an athlete with a race pace of 15.00 km/h (=4:00 min/km) over the 1000-m distance and of 16.36 km/h (=3:40 min/km) over the 500-m distance, who trains 2-min-intervals at a pace of 14.50 km/h (=4:08 min/km), would have a Z3 session when analysing based on 1000-m race pace (14.50 km/h=97% of 1000-m race pace), but only a Z2 session when 500-m race pace (14.50 km/h=89% of 500 m race pace) is the benchmark for analysis. A possible compromise could be to use the race pace of the main competition which an athlete is primarily focusing on. If an athlete competes in two different disciplines (e.g. 200 m and 500 m), one might consider using the race pace of an intermediate distance (e.g. 350 m) to provide a TID quantification. A further method could be the training intensity prescription and/or analysis based on the individual session aim (e.g. the individual race pace of the targeted race distance in each session). This approach has been discussed previously [23] and focusses on the training of the athletes' entire locomotor profile (e.g. start phase performance and anaerobic speed) instead of solely focusing on developing a single physiological performance parameter (e.g. speed at anaerobic threshold). As competition performance is determined by the interaction of different performance-related parameters [24], this method, oriented on the race distance targeted in the individual session, may provide a more goal-orientated approach compared to training prescription solely based on physiological parameters. However, this method is suggested to be mostly valuable for experienced athletes and coaches who know the best performance times on several distances and have low intersession performance variation [23]. Ultimately, in contrast to TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} , the aforementioned examples for adjusting the quantification of TID_{Race} demonstrate the flexibility of this method for adapting specific aims and circumstances of each athlete in his/her preparation.

Since TID_{Bla-HR} , TID_{Bla-V} and TID_{Race} demonstrate up- and downsides it appears important for researchers and coaches to raise the question about "what is the main aim of the current training phase?". The race pace-based approach might be of value during competition periods, but during periods with less emphasis on specific race

pace development the threshold-based approach might be more valuable. Additionally, a shift from a TID_{HR} and TID_{Bla} during preparatory periods to a race pace-based approach during the competition period would be in accordance with one of the most accepted principles of training, which is the principle of specific adaptations to the imposed demands [36] (SAID-principle). The SAID-principle considers the versatility of influences, beside the traditional metabolic considerations, that impact race performance. Especially, as until today, research failed to find the one optimal TID model and/or physiological parameter to predict performance [3, 8], race pace-based intensity prescription may provide a better stimulus to concurrently develop key endurance variables in the final preparation for competition performance [8].

Limitations

Certain limitations associated with the current investigation warrant consideration. The relatively small number of subjects may have affected the power of the statistical analysis. However, it is difficult to conduct investigations of this nature on large numbers of highly trained athletes who must prioritize their own individual training and competition. We believe that the current investigation provides useful information for coaches and researchers in this specific field. Moreover, it is important to note that on-water TID analysis does not provide a comprehensive evaluation of the stress an athlete is exposed to. Non-specific training (e.g. resistance training, dry-land endurance training, etc.) and various additional factors (e.g. sleep, daily physical activity, nutrition, etc.) have an impact on overall training stress and need to be considered when holistically evaluating an athletes training stress [37, 38]. Furthermore, as discussed earlier, when analysing data from an outdoor sport like kayaking, one must be aware of the unstable nature of the sport that is constantly influenced by water and weather conditions. Thus, a future challenge for research is to provide models to minimize the impact of environmental fluctuations on TID analysis.

Conclusion

The current study aimed to retrospectively compare TID quantification based on physiologically determined intensity zones as well as race pace-based zone determination using velocity monitoring during the competition period in highly trained kayak sprint athletes. Based on the present data and observation period we conclude that the method of quantification affects the calculation of the TID in highly trained sprint kayakers. The most noticeable difference between the TID determination method is the comparably low interindividual variation in TID for TID_{Race} . Depending on the aim of the analysis and

training goal TID_{Race} , TID_{Bla-HR} and TID_{Bla-V} have advantages as well as drawbacks and may be implemented in conjunction to maximize adaptation.

Abbreviations

a.u.: Arbitrary unit; B_{Lact} : Blood lactate; CI: Confidence interval; GPS: Global position system; P-ID: Participant identification; Pol-Index: Polarization-Index; RPE: Rating of perceived exertion; TID: Training intensity distribution; TID_{Bla-HR} : Training intensity distribution derived from heart rate based on blood lactate concentrations of incremental step testing; TID_{Bla-V} : Training intensity distribution derived from velocity based on blood lactate concentrations of incremental step testing; TID_{Race} : Training intensity distribution derived from velocity based on 1000-m race pace; HR: Heart rate; HR_{Peak} : Peak heart rate; VO_2 : Oxygen uptake; VO_{2max} : Maximum oxygen uptake; Z: Zone.

Acknowledgements

The authors would like to thank all the athletes and coaches for their cooperation and for the time they dedicated to this study.

Authors' contributions

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by MM, CZ and BS. Data were exported and processed by RL. The first draft of the manuscript was written by MM. MM, CZ and BS commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

The project was supported financially by the German Federal Institute of Sports Sciences.

Availability of Data and Materials

As the athletes in this study are still competing on national and international level, supporting data are not available.

Declarations

Ethics Approval and Consent to Participate

This study was approved by the Ethics Committee of the Julius-Maximilians University of Würzburg and conforms to the Declaration of Helsinki. Prior to participation, written informed consent was obtained.

Consent for Publication

Not applicable.

Competing Interests

Billy Sperlich, Christoph Zinner, Manuel Matzka and Robert Leppich declare that they have no competing interests.

Author details

¹Integrative and Experimental Exercise Science and Training, University of Würzburg, Würzburg, Germany. ²Software Engineering Group, Department of Computer Science, University of Würzburg, Würzburg, Germany. ³Department of Sport, University of Applied Sciences for Police and Administration of Hesse, Wiesbaden, Germany.

Received: 5 August 2021 Accepted: 14 November 2021

Published online: 06 January 2022

References

- Esteve-Lanao J, Foster C, Seiler S, Lucia A. Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *J Strength Cond Res.* 2007;21:943–9.
- Mujika I, Chatard JC, Busso T, Geysant A, Barale F, Lacoste L. Effects of training on performance in competitive swimming. *Can J Appl Physiol Rev Can Physiol Appl.* 1995;20:395–406.
- Seiler S, Kjerland G. Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an „optimal“ distribution? *Scand J Med Sci Sports.* 2006;16:49–56.
- Stöggl T, Sperlich B. The training intensity distribution among well-trained and elite endurance athletes. *Front Physiol.* 2015;6:295.
- Seiler S. What is best practice for training intensity and duration distribution in endurance athletes? *Int J Sports Physiol Perform.* 2010;5:276–91.
- Bellinger P, Arnold B, Minahan C. Quantifying the training-intensity distribution in middle-distance runners: the influence of different methods of training-intensity quantification. *Int J Sports Physiol Perform.* 2020;15:319–23.
- Kenneally M, Casado A, Gomez-Ezeiza J, Santos-Concejero J. Training intensity distribution analysis by race pace vs. physiological approach in world-class middle- and long-distance runners. *Eur J Sport Sci.* 2021;21:819–26.
- Kenneally M, Casado A, Santos-Concejero J. The effect of periodization and training intensity distribution on middle- and long-distance running performance: a systematic review. *Int J Sports Physiol Perform.* 2018;13:1114–21.
- Stöggl T, Sperlich B. Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Exerc Physiol.* 2014;5:33.
- Uali I, Herrero AJ, Garatachea N, Marín PJ, Alvear-Ordenes I, García-López D. Maximal strength on different resistance training rowing exercises predicts start phase performance in elite kayakers. *J Strength Cond Res.* 2012;26:941–6.
- Calbet JAL, Holmberg H-C, Rosdahl H, van Hall G, Jensen-Urstad M, Saltin B. Why do arms extract less oxygen than legs during exercise? *Am J Physiol-Regul Integr Comp Physiol.* 2005;289:R1448–558.
- Ørtenblad N, Nielsen J, Boushel R, Söderlund K, Saltin B, Holmberg H-C. The muscle fiber profiles, mitochondrial content, and enzyme activities of the exceptionally well-trained arm and leg muscles of elite cross-country skiers. *Front Physiol.* 2018. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01031/full>.
- Zinner C, Morales-Alamo D, Ørtenblad N, Larsen FJ, Schiffer TA, Willis SJ, Gelabert-Rebato M, Perez-Valera M, Boushel R, Calbet JA, Holmberg HC. The physiological mechanisms of performance enhancement with sprint interval training differ between the upper and lower extremities in humans. *Front Physiol.* 2016;7:426.
- Kahl J. DKV-Rahmentrainingskonzeption–Kanurennsport und Kanuslalom. Duisburg Dtsch Kanu-Verband-Wirtschafts-Verl GmbH. 2005.
- Treff G, Winkert K, Sareban M, Steinacker JM, Becker M, Sperlich B. Eleven-week preparation involving polarized intensity distribution is not superior to pyramidal distribution in national elite rowers. *Front Physiol.* 2017. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00515/full>.
- Treff G, Winkert K, Sareban M, Steinacker JM, Sperlich B. The Polarization-Index: a simple calculation to distinguish polarized from non-polarized training intensity distributions. *Front Physiol.* 2019. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00707/full>.
- Matzka M, Zinner C, Kunz P, Holmberg H-C, Sperlich B. Comparison of physiological parameters during on-water and ergometer kayaking and their relationship to performance in sprint kayak competitions. *Int J Sports Physiol Perform.* 2021;16:958–64.
- Winchcombe CE, Binnie MJ, Doyle MM, Hogan C, Peeling P. Development of an on-water graded exercise test for flat-water sprint kayak athletes. *Int J Sports Physiol Perform.* 2019;1:21–21.
- Carrasco Páez L, Martínez Díaz IC, del Hoyo Lora M, Sañudo Corrales FB, Ochiana N. Ergometric testing for top-level kayakers: validity and reliability of a discontinuous graded exercise test. *Kinesiol Slov.* 2010;16:16–20.
- Zinner C, Schäfer Olstad D, Sperlich B. Mesocycles with different training intensity distribution in recreational runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2018;50:1641–8.
- Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med.* 1970;2:92–8.
- Sanders D, Myers T, Akubat I. Training-intensity distribution in road cyclists: objective versus subjective measures. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12:1232–7.
- Buchheit M, Laursen PB. High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: part I: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med Auckl NZ.* 2013;43:313–38.
- van Someren KA, Howatson G. Prediction of flatwater kayaking performance. *Int J Sports Physiol Perform.* 2008;3:207–18.

25. Hogan C, Binnie MJ, Doyle M, Lester L, Peeling P. Comparison of training monitoring and prescription methods in sprint kayaking. *Int J Sports Physiol Perform*. 2019;15:654–62.
26. Hogan C, Binnie MJ, Doyle M, Lester L, Peeling P. Heart rate and stroke rate misrepresent supramaximal sprint kayak training as quantified by power. *Eur J Sport Sci*. 2021;21:656–65.
27. Pérez-Landaluce J, Rodríguez-Alonso M, Fernández-García B, Bustillo-Fernández E, Terrados N. Importance of wash riding in kayaking training and competition. *Med Sci Sports Exerc*. 1998;30:1721–4.
28. Esteve-Lanao J, San Juan AF, Earnest CP, Foster C, Lucia A. How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37:496–504.
29. Lucia A, Hoyos J, Pardo J, Chicharro JL. Metabolic and neuromuscular adaptations to endurance training in professional cyclists: a longitudinal study. *Jpn J Physiol*. 2000;50:381–8.
30. Plews DJ, Laursen PB, Kilding AE, Buchheit M. Heart-rate variability and training-intensity distribution in elite rowers. *Int J Sports Physiol Perform*. 2014;9:1026–32.
31. Schumacher YO, Mueller P. The 4000-m team pursuit cycling world record: theoretical and practical aspects. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:1029–36.
32. Sylta Ø, Tønnessen E, Seiler S. From heart-rate data to training quantification: a comparison of 3 methods of training-intensity analysis. *Int J Sports Physiol Perform*. 2014;9:100–7.
33. Zapico AG, Calderón FJ, Benito PJ, González CB, Parisi A, Pigozzi F, DiSalvo V. Evolution of physiological and haematological parameters with training load in elite male road cyclists: a longitudinal study. *J Sports Med Phys Fitness*. 2007;47:191–6.
34. Sandbakk Ø, Holmberg H-C, Leirdal S, Ettema G. The physiology of world-class sprint skiers. *Scand J Med Sci Sports*. 2011;21:e9–16.
35. Kenneally M, Casado A, Gomez-Ezeiza J, Santos-Concejero J. Training characteristics of a World Championship 5000-m finalist and multiple continental record holder over the year leading to a World Championship final. *Int J Sports Physiol Perform*. 2021;1–5.
36. Plisk S. Training principles and program design. *Strategies Routledge*. 2005;18:16–21.
37. Kiely J. Periodization theory: confronting an Inconvenient Truth. *Sports Med*. 2018;48:753–64.
38. Sperlich B, Holmberg H-C. The responses of elite athletes to exercise: an all-day, 24-h integrative view is required! *Front Physiol*. 2017;8:564.

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Submit your manuscript to a SpringerOpen[®] journal and benefit from:

- Convenient online submission
- Rigorous peer review
- Open access: articles freely available online
- High visibility within the field
- Retaining the copyright to your article

Submit your next manuscript at ► [springeropen.com](https://www.springeropen.com)
