

Die Wirksamkeit von geerdetem Schlaf auf die Erholung nach intensiver exzentrischer Muskelbelastung

Copyright der deutschen Übersetzung: tz-gesundheit®

Erich Müller^{1,2}, Patrick Pröllner¹, Fatima Ferreira-Briza³, Lorenz Aglas³ und Thomas Stöggl^{1*}

¹ *Fachbereich Sport- und Bewegungswissenschaft, Universität Salzburg, Salzburg, Österreich,* ² *Olympiazentrum Salzburg-Rif, Hallein, Österreich,* ³ *Fachbereich Biowissenschaften, Universität Salzburg, Salzburg, Österreich*

Zweck: Wir untersuchten die Wirksamkeit von geerdetem Schlaf auf den zeitlichen Verlauf der Erholung nach intensiver exzentrischer Muskelbelastung in Bezug auf Muskelkater und sportliche Leistungsfähigkeit.

Methoden: Für diese Studie wurden 22 gesunde Probanden rekrutiert und randomisiert einer Interventionsgruppe (GRD, geerdeter Schlaf, n = 12) bzw. einer Kontrollgruppe (UGD, scheinbar geerdeter Schlaf, n = 10) zugewiesen, um die Wirkung von 10 Erholungstagen mit geerdetem vs. scheinbar geerdetem Schlaf nach einer einmaligen intensiven Laufbandintervention mit Bergablauf in dreifacher Verblindung (Proband, Tester und Datenanalyst) zu beurteilen. Zur Operationalisierung der Erholung wurde vor der Intervention (Baseline) und an den Tagen 1, 2, 3, 5, 7 und 10 nach der Intervention eine Testbatterie durchgeführt: (1) Wahrnehmung von Muskelkater (VAS), (2) Kreatinkinase-Blutspiegel (CK), (3) maximale willkürliche isometrische Kontraktion (MVIC) für beide Beine, (4) Leistung beim Counter Movement Jump (CMJ; Vertikalsprung mit Ausholen aus aufrechter Körperposition) und beim Drop Jump (DJ; Tief-Hoch-Sprung aus vorgegebener Niedersprunghöhe). Darüber hinaus wurde bei vier Teilnehmern Blut für eine detaillierte Analyse des Blutstatus und der Entzündungsparameter im Serum entnommen.

Ergebnisse: Die Laufbandintervention mit Bergablauf führte zu deutlichen erschöpfungsbedingten Veränderungen aller gemessenen Parameter. Diese Veränderungen waren bereits 5 Minuten nach der Intervention nachweisbar und hatten sich 10 Tage nach der Intervention noch nicht vollständig zurückgebildet. Geerdeter Schlaf (GRD) führte zu einer weniger stark ausgeprägten Leistungsabnahme (CMJ, MVIC) und einem geringeren Kreatinkinase-Anstieg im Vergleich zu ungeerdetem Schlaf (UGD) (alle $P < 0,05$). Eine detaillierte Analyse der Blutproben zeigte, dass geerdeter Schlaf den Erholungsprozess moduliert, (a) indem die Hämokonzentration konstant aufrechterhalten wird, wie die Zahl der Erythrozyten und die Hämoglobin/Hämatokrit-Werte verdeutlichen, und (b) indem die mit Muskelschäden assoziierten Entzündungsparameter wie IP-10, MIP-1 α und sP-Selectin gesenkt werden.

Fazit: Das Laufprotokoll mit Bergablauf ist eine geeignete Methode, um länger anhaltenden Muskelkater und Muskelermüdung herbeizuführen. Es wurde gezeigt, dass geerdeter Schlaf (GRD) zu schnellerer Erholung und/oder weniger stark ausgeprägten Markern für Muskelschäden und Entzündungen führte. Geerdetes Schlafen (GRD) könnte als einfache Methode zur Verbesserung der akuten und langfristigen Erholung nach intensivem exzentrischem Training betrachtet werden.

Keywords: Kreatinkinase (CK), Bergablauf, Entzündung, Muskelkater, Muskelkraft

Copyright der deutschen Übersetzung: tz-gesundheit®

EINLEITUNG

Die Erholung nach intensiven Trainingseinheiten ist sowohl für Profi- als auch für Freizeitsportler von entscheidender Bedeutung. Es ist allgemein bekannt, dass trainingsbedingte Muskelschäden üblicherweise auf neue, ungewohnte, repetitive Bewegungen und/oder anstrengende exzentrische Muskelkontraktionen folgen (Proske und Morgan, 2001; Proske et al., 2004; Mackey et al., 2008). Diese Art äußerer Belastung verursacht Muskelschäden, die mit verzögert einsetzendem Muskelkater verbunden sind (Hough, 1902).

Trainingsbedingte Muskelschäden sind oft mit erheblichen vorübergehenden Leistungsabfällen, lokalen Muskelschmerzen und einem erhöhtem Risiko für Verletzungen des Bewegungsapparates verbunden. Profisportler müssen sich innerhalb weniger Tage erholen und ihr Leistungsniveau wieder erreichen. Trotz der Häufigkeit und der finanziellen Auswirkungen von verzögert einsetzendem Muskelkater bei Spitzensportlern bleiben die diesen tatsächlich unterliegenden Mechanismen und ihre Auswirkungen auf Leistung und Behandlungsstrategien im Unklaren (Cheung et al., 2003). Um die klinischen Symptome von verzögert einsetzendem Muskelkater zu lindern, wird eine Reihe von herkömmlichen Therapiestrategien angewendet. Cheung et al. (2003) und Seidel et al. (2012) kamen jedoch zu dem Ergebnis, dass keine der Behandlungsstrategien die Muskelerholung tatsächlich gezielt unterstützt oder verbessert habe. Dies deutet darauf hin, dass tatsächlich keine überzeugenden evidenzbasierten und praktischen Strategien zur Prävention oder Linderung von verzögert einsetzendem Muskelkater vorhanden sind.

Erdung, Earthing oder geerdeter Schlaf ist ein Vorgang, bei dem der Sportler über ein elektrisch leitendes Gerät geerdet wird. Die Person wird auf indirekte Art und Weise geerdet, wie es dem direkten, ununterbrochenen Barfuß-Kontakt mit der Erde entspricht. Aufgrund von zunehmender Verstärkung, isolierendem Schuhwerk und asphaltierten Straßen ist es heutzutage fast unmöglich, sich zu erden. Es gibt verschiedene Erdungssysteme, die einen Kontakt mit der Erdoberfläche ermöglichen. Diese indirekte Art der Erdung basiert auf trivialen leitfähigen Systemen wie Bettlaken, Matten, Arm- oder Fußbändern sowie Klebepatches, die beim Schlafen oder Arbeiten sowie in Schuhen verwendet werden können. Durch ein typisches Kabel, das in eine geerdete Steckdose gesteckt wird, werden diese Geräte an die Erde gekoppelt. Mit Bezug auf Chevalier et al. (2006), Oschman (2007) und Oschman et al. (2015) basiert die zentrale Hypothese zur Erdung auf der Verbindung mit der Erdoberfläche, die mit freien Elektronen gesättigt ist. Durch diesen indirekten oder direkten Kontakt mit der Erde können „mobile“ Elektronen in den Körper wandern. Oschman (2007) weist darauf hin, dass diese freien Elektronen im Körper als Antioxidanzien wirken und reaktive Sauerstoffspezies neutralisieren könnten. Reaktive Sauerstoffspezies sind Nebenprodukte des Sauerstoffwechsels der Mitochondrien und werden durch den oxidativen Burst im Zuge der Entzündungsreaktion freigesetzt. Harman (1956, 2009) vertrat die These, dass diese reaktiven chemischen Spezies mit dem Alterungsprozess verbunden sind. Dies wurde ursprünglich als Theorie der freien Radikale bezeichnet und in den 1970er-Jahren zur Theorie des mitochondrialen Alterns weiterentwickelt. **Seit einigen Jahren deuten neu gewonnene Erkenntnisse darauf hin, dass reaktive Sauerstoffspezies mit der Entstehung von Tumoren, Krebs und chronisch entzündlichen Systemerkrankungen zusammenhängen (Reddy und Clark, 2004; Waris und Ahsan, 2006; Gupta et al., 2012). Daher legt Oschman (2007) nahe, dass die auf Erdung basierenden mobilen Elektronen auch Entzündungen vorbeugen oder lindern könnten.**

Es gibt tatsächlich keine evidenzbasierten Untersuchungen zur Wirksamkeit von Erdung. Die narrative Übersichtsarbeit von Chevalier et al. (2012) schloss Studien zur Erdung mit ein, die auf verbesserten Schlaf (Ghaly und Teplitz, 2004), bessere Indizes bei verzögert einsetzendem Muskelkater (Brown et al.,

2010; Brown et al., 2015), einen verbesserten autonomen Tonus (Sinatra, 2011) und eine verminderte Blutviskosität (Chevalier et al., 2013; Brown und Chevalier, 2015) hindeuten. Aufgrund der möglicherweise verminderten Blutviskosität, einer gesteigerten Blutflussgeschwindigkeit, einer besseren Schlafqualität und reduzierten Muskelschäden wird vorgeschlagen, dass die Erdung nach einem anstrengenden Training als geeignetes und wirksames Instrument zur Erholung eingesetzt werden könnte. Dennoch gibt es derzeit keine eindeutigen Nachweise für Behandlungsstrategien, die eine Erholung nach trainingsbedingten Muskelschäden beschleunigen.

Ziel dieser Studie war es deshalb, die Wirksamkeit von geerdetem Schlaf auf den zeitlichen Verlauf von verzögert einsetzendem Muskelkater und sportlicher Leistungsfähigkeit nach intensivem Bergablauf zu untersuchen. Unsere Hypothese war, dass geerdeter Schlaf trainingsbedingten Muskel[kater] lindern und die Wiederherstellung der sportlichen Leistungsfähigkeit nach einem anstrengenden Bergablauf beschleunigen würde.

Materialien und Methoden

Teilnehmer

Für diese Studie wurden 22 gesunde Sportwissenschafts- und Physiotherapie-Studenten (Mittelwert \pm SD; n = 22, 10 Frauen, 12 Männer, Alter: $23,8 \pm 3,2$ Jahre, Gewicht: $67,2 \pm 7,6$ kg, Größe: $174,2 \pm 6,3$ cm) rekrutiert. Alle Teilnehmer waren frei von Erkrankungen des Bewegungsapparates sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen und nahmen keine Nahrungsergänzungsmittel oder verschreibungspflichtigen Medikamente ein, die sich potenziell auf die Muskelerholung auswirken könnten. Alle Teilnehmer wurden ausführlich mündlich und schriftlich über die Verfahren und möglichen Risiken informiert und stimmten der Teilnahme schriftlich zu. Die Studie wurde von der zuständigen Ethikkommission der Universität Salzburg (Kapitelgasse 4, 5020 Salzburg, GZ 13/2017) genehmigt und gemäß der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Als Entschädigung erhielten die Teilnehmer Erdungsprodukte. Die Teilnehmer wurden randomisiert der Interventionsgruppe (GRD, geerdetes Schlafen, n = 12) oder der Kontrollgruppe (UGD, scheinbar geerdetes Schlafen, n = 10) zugewiesen. Es wurden keine Unterschiede bei den Baseline-Werten zwischen den Gruppen festgestellt (Tabelle 1).

Studiendesign

Es wurde ein dreifach verblindetes (Proband, Tester und Datenanalyst) randomisiertes kontrolliertes Studiendesign verwendet, um die Wirkung von 10 Erholungstagen mit geerdetem Schlaf (GRD) oder scheinbar geerdetem Schlaf (UGD) nach einer einmaligen intensiven Laufbandintervention mit Bergablauf zu beurteilen. Die Intervention wurde entwickelt, um verzögert einsetzenden Muskelkater hervorzurufen. Zur Operationalisierung der Erholung wurde eine Testbatterie vor der Intervention (Baseline) und an den Tagen 1, 2, 3, 5, 7 und 10 nach der Intervention durchgeführt. Diese Testbatterie umfasste: Wahrnehmung von Muskelkater anhand der visuellen Analogskala (VAS), Kreatinkinase-Blutspiegel (CK), maximale willkürliche isometrische Kontraktion (MVIC) für beide Beine, Leistung beim Counter Movement Jump (CMJ; Vertikalsprung mit Ausholen aus aufrechter Körperposition) und beim Drop Jump (DJ; Tief-Hoch-Sprung aus vorgegebener Niedersprunghöhe) (siehe Abbildung 1). Darüber hinaus wurde als Pilotstudie vier Teilnehmern (geerdet schlafende Gruppe (GRD), n = 2 und scheinbar geerdet schlafende Gruppe (UGD), n = 2) Blut für eine detaillierte Analyse des Blutstatus und der Entzündungsparameter im Serum entnommen.

Tabelle 1 Physikalische Charakteristika der Teilnehmer der geerdeten Gruppe (GRD) versus der ungeerdeten Gruppe (UGD)

Group	Body			DJ-Coefficient					
	Height (m)	mass (kg)	Age (years)	CMJ-Height (cm)	(height/time)	MVIC-R (N)	MVIC-L (N)	CK (U/L)	VAS (6–20)
GRD	177 ± 8	71 ± 10	23.9 ± 4.1	29.2 ± 6.0	140 ± 43	2029 ± 749	1986 ± 780	261 ± 168	4.6 ± 4.3
UGD	174 ± 7	67 ± 9	23.7 ± 2.3	27.4 ± 7.4	115 ± 28	1713 ± 507	1596 ± 539	154 ± 99	3.7 ± 4.0

SJ, squat jump; DJ, drop jump; MVIC-R, MVIC-L, maximum isometric voluntary contraction right-left leg; CK, creatine kinase; VAS, visual analog scale.

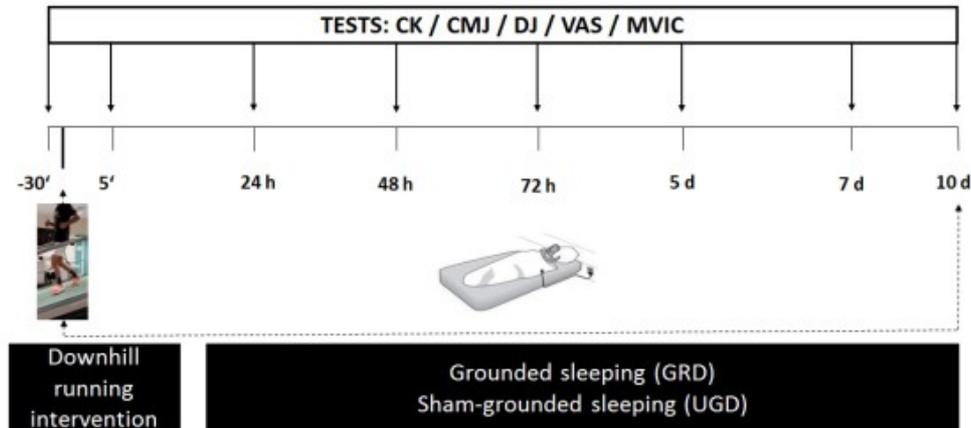


ABBILDUNG 1 | Schematische Illustration des Testverfahrens mit zeitlichem Ablauf: Vortest (–30 min vor der Intervention), Intervention (Bergablauf), Nachttests (+5 min, 24 h, 48 h, 72 h, 5 Tage, 7 Tage und 10 Tage nach der Intervention), bestehend aus Bestimmung des Kreatinkinase-Gehalts (CK) im Blut, visueller Analogskala (VAS) in Bezug auf Muskelkater, Leistung beim Drop Jump (DJ), Leistung beim Counter Movement Jump (CMJ) und maximale isometrische Kontraktion (MVIC) des linken und rechten Beins.

Instrumente und Verfahren

Bergablauf

Alle Teilnehmer durchliefen eine 20-minütige Trainingseinheit mit intensivem Bergablauf (–25 % Steigung, $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) auf einem motorisierten Laufband (Saturn 300/100 rs, h/p/cosmos sports & medical GmbH, Deutschland). Zur Bestimmung der physiologischen und psychologischen Belastung der Intervention wurden die Herzfrequenz (Suunto Ambit 3.0, Helsinki, Finnland) und das Blutlaktat (Biosen S-Line EFK Diagnostik, Deutschland) in der 1., 3. und 5. Minute nach der Intervention sowie die Einschätzung des Anstrengungsempfindens (BORG 6–20) in der letzten Laufminute erhoben.

Geerdeter oder scheinbar geerdeter Schlaf

Während der 10 Tage nach der Intervention schlief die GRD-Gruppe geerdet mit einem leitfähigen Laken, das an eine geerdete Wandsteckdose angeschlossen war, während die UGD-Gruppe nur scheinbar geerdet schlief. Beide Gruppen erhielten vor Beginn der Studie identische Laken von BTZ (Badisches Therapie Zentrum, Baden-Baden, Deutschland). Diese Bettlaken (Größe 90 cm x 200 cm) bestehen aus 100 % Baumwolle, in die leitfähige Silberfasern eingewebt sind. Am Laken ist ein geerdetes Kabel befestigt, das am anderen Ende mit der Erde der Wandsteckdose verbunden ist. Es gibt keine direkte Verbindung zum Strom; die Erdung auf indirekte Weise (z. B. Kabel) ist sicher und gefährdet die Personen nicht. Um die Kontrollsituation und die anschließende Verblindung

zu ermöglichen, wurden die Erdungsstecker von einer unabhängigen Person manipuliert und getarnt. Weder der Versuchsleiter noch die Teilnehmer waren über diesen Eingriff am geerdeten System informiert. Die Teilnehmer wurden angewiesen, zuhause geerdet auf ihren Laken zu schlafen und dabei so viel Hautkontakt wie möglich zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde die Teilnehmer immer wieder darauf aufmerksam gemacht, dass es am besten wäre, entweder nackt zu schlafen oder allenfalls nicht mehr als Unterwäsche zu tragen. Die Teilnehmer durften mit einem nicht geerdeten Kopfkissen schlafen. Für den Fall, dass ein Teilnehmer an einem der 10 Tage nicht zu Hause schlafen sollte, wurde dazu aufgefordert, das Laken mitzunehmen.

Vor Beginn der Hauptstudie wurde eine Pilotstudie (n = 10) über die Auswirkungen der Erdung mit den leitfähigen Laken (geerdet vs. scheinbar geerdet) durchgeführt. Die Teilnehmer wurden aufgefordert, sich auf eine Massageliege zu legen und sich, nur mit Unterwäsche bekleidet, sowohl auf dem geerdeten 139 als auch auf dem scheinbar geerdeten Laken für jeweils 5 Minuten zu entspannen. Die elektrostatische Ladung wurde auf der Haut im Bereich des vastus lateralis über ein elektrostatisches Voltmeter (ESVM 1000, Wolfgang Warmbier, Deutschland) gemessen. Die Pilotstudie ergab Werte von $-0,2 \pm 0,1$ V vs. $-81,9 \pm 25,6$ V ($P < 0,001$) in der geerdeten vs. scheinbar geerdeten Situation. Dies zeigt deutlich die Wirkung der Erdung über das leitfähige Laken.

Counter Movement Jump und Drop Jump

Der Counter Movement Jump (CMJ) wurde ohne Armschwingen ausgeführt, der Drop Jump (DJ) wurde aus 40 cm Höhe durchgeführt. Beide Sprungmodi wurden auf einer Kraftmessplatte (BP600900, AMTI, Vereinigte Staaten) ausgeführt, um die maximale Sprunghöhe (beim CMJ und DJ) sowie die Bodenkontaktzeit und den Koeffizienten von Sprunghöhe und Bodenkontaktzeit beim DJ beurteilen zu können. Für die folgende Analyse wurde der beste aus drei Versuchen verwendet.

Maximale willkürliche isometrische Kontraktion (MVIC)

Die MVIC des linken und des rechten Beins wurde anhand einer selbst konstruierten einseitigen horizontalen Beinpresse mit integrierter Wägezelle (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Deutschland) bestimmt. Die Teilnehmer saßen dort mit einem Kniebeugewinkel von 110° (180° entspricht der kompletten Kniestreckung) und durften die Handgriffe verwenden. Der individuell eingerichtete Kniebeugewinkel wurde anhand eines Goniometers dokumentiert, um identische Einstellungen bei Baseline und den nachfolgenden Tests sicherzustellen. Für die folgende Analyse wurde der beste aus drei Versuchen verwendet. Das stärkere Bein bei Baseline wurde als dominantes Bein festgelegt. Die Forscher feuerten die Versuchsteilnehmer durch Zurufe an.

Kreatinkinase (CK)

Das CK-Enzym ist eines der am häufigsten berichteten objektiven Anzeichen für verzögert einsetzenden Muskelkater, der mit Muskelschäden einhergeht (Eston et al., 1994; Urhausen et al., 1995; Brown et al., 2015; Saw et al., 2016). Zur CK-Bestimmung wurden $32 \mu\text{l}$ Kapillarblut entnommen und mit dem Reflotron Sprint System (Roche Diagnostics GmbH, Deutschland) untersucht.

Wahrnehmung von Muskelkater (VAS)

Zur Einschätzung der Muskelschmerzen in der unteren Extremität wurde die visuelle Analogskala (VAS) verwendet. Die Länge der VAS betrug 100 mm und die Teilnehmer mussten zu Beginn jedes Testtages einen Wert in die Skala eintragen. Die VAS wird gemeinhin zur Einschätzung von Muskelkater verwendet und ist ein valider und reliabler Test (Bijur et al., 2001; Gallagher et al., 2001).

Blutproben

Bei vier Probanden wurde zu jedem der Testzeitpunkte venöses Blut entnommen. Alle Blutentnahmen wurden von erfahrenem und qualifiziertem Fachpersonal durchgeführt. Die Analyse der Blutwerte (Erythrozyten, Hämoglobin, Hämatokrit, MCV, MCH, MCHC, Leukozyten, Monozyten, Granulozyten, Thrombozyten und Lymphozyten) wurde mit einem Celltac MEK-6500 (EuroLAB, Hallein, Österreich) durchgeführt.

Die aus dem Serum abgeleiteten Entzündungsparameter, darunter sE-Selectin, GM-CSF, sICAM-1/CD54, IFN α , IFN γ , IL-1 α , IL-1 β , IL-4, IL-6, IL-8, IL-10, IL-12p70, IL-13, IL-17A/CTLA-8, IP-10/CXCL10, MCP-1/CCL2, MIP-1 α /CCL3, MIP-1 β /CCL4, sP-Selectin und TNF alpha wurden mit einem Luminex[®] MAGPIX[®] System (Luminex Corporation, Austin, TX, Vereinigte Staaten) unter Verwendung eines 20-Plex Human ProcartaPlex Panel[™] (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, Vereinigte Staaten) analysiert. Der Wert des C-reaktiven Proteins wurde aus Vollblut unter Verwendung eines EUROLyser CUBE-S (EUROLyser Diagnostica GmbH, Salzburg, Österreich) bestimmt. Die Rohdaten wurden basierend auf den Baseline-Wert (Tag 0) zu Prozentunterschieden (Gleichung: $100 \cdot (\text{Baseline-Wert}/\text{Baseline})$) normiert.

Statistische Analyse

Alle Daten wiesen eine Gauß'sche Verteilung auf, die durch den Shapiro-Wilk-Test bestätigt wurde. Entsprechend werden im Folgenden Mittelwerte (\pm SD) dargestellt. Die Auswirkungen des Bergablaufs am Laufband auf die verschiedenen Testparameter wurden anhand von gepaarten t-Tests untersucht. Dabei wurden die Messwerte zwischen Baseline und 5 Minuten nach der Intervention verglichen. Alle bereits nach geerdetem oder scheinbar geerdetem Schlaf (Tag 1–10) erhobenen Testdaten wurden anhand ihrer prozentualen Veränderung zum Baseline-Wert (Tag 0) verglichen. Es wurde eine 2 x 6-Varianzanalyse mit wiederholten Messungen verwendet, um die beiden Gruppen (geerdetes Schlafen (GRD) vs. scheinbar geerdetes Schlafen (UGD)) im Verlauf der sechs Zeitpunkte (Tag 1, 2, 3, 5, 7 und 10) zu vergleichen. Die Blutwerte wurden mit der GraphPad Prism 7-Software (La Jolla, CA, Vereinigte Staaten) analysiert. Die statistische Analyse der Blutwerte und Entzündungsparameter fand unter Verwendung eines ungepaarten t-Tests mit Welch-Korrektur statt. Das Alpha-Signifikanzniveau wurde auf 0,05 festgesetzt. Außerdem wurden die Messwerte durch Berechnung der Effektstärke (η^2_p) und der Teststärke ausgewertet. Für die statistische Analyse wurde das Statistik-Softwarepaket für die Sozialwissenschaften (Version 24.0; SPSS Inc., Chicago, IL, Vereinigte Staaten) verwendet.

ERGEBNISSE

In beiden Gruppen führte das intensive Laufbandprotokoll mit Bergablauf zu hoher physiologischer (z. B. Herzfrequenz von 200 bpm) und psychologischer Belastung (subjektives Belastungsempfinden (RPE) 18–19), wobei die scheinbar geerdete schlafende Gruppe (UGD) beim Blutlaktat-Spitzenwert (5,1 vs. 3,3 mmol \cdot L⁻¹, $P = 0,047$) und dem subjektiven Belastungsempfinden (RPE; 18,9 vs. 18,3, $P = 0,033$) (Tabelle 2) etwas stärker reagierte als die geerdete schlafende Gruppe (GRD). Die Intervention führte zu einer deutlichen Verringerung der

Sprungleistung (Sprunghöhe beim CMJ, Sprunghöhe beim DJ, Koeffizient beim DJ, alle $P < 0,001$), einer maximalen willkürlichen isometrischen Kontraktion bei der Bein Streckung (beide Beine $P < 0,001$) und höheren Werten auf der visuellen Analogskala (VAS), die mit Muskelkater in Zusammenhang stehen. Die Kreatinkinase-Spiegel waren sowohl in der geerdet schlafenden (GRD) ($P = 0,003$) als auch der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) ($P = 0,024$) erhöht.

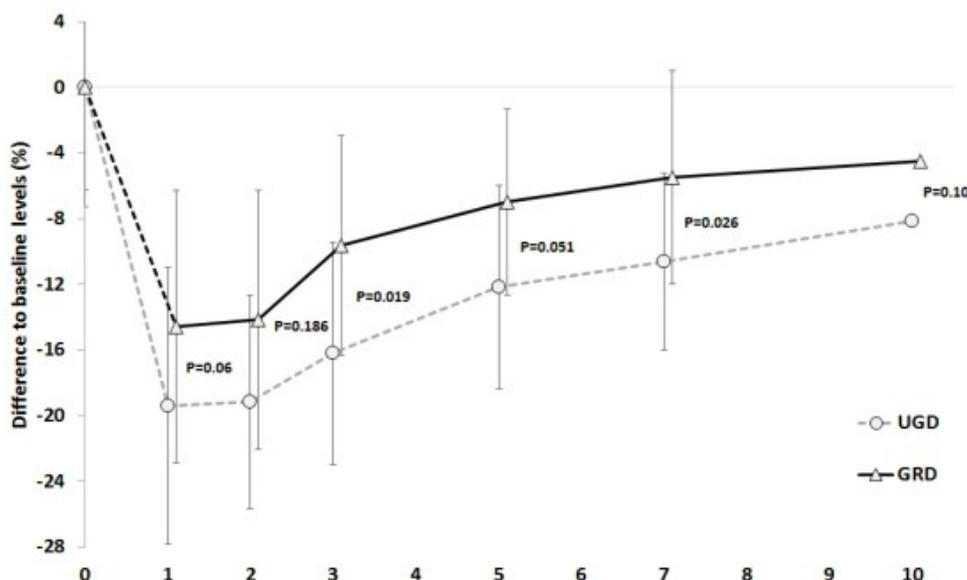
TABELLE 2 | Physische und psychologische Anstrengung während des Bergablaufs am Laufband in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) und in der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) (Mittelwert \pm SD).

	LA _{peak} (mmol · L ⁻¹)	HR _{max} (bpm)	HR _{mean} (bpm)	RPE (6–20)
GRD	3.2 \pm 1.3	201 \pm 12	177 \pm 12	18.3 \pm 0.8
UGD	5.1 \pm 2.9*	201 \pm 8	177 \pm 11	18.9 \pm 0.7*

LA_{peak}, Laktat-Spitzenwert in den ersten 5 Minuten nach der Intervention; HR_{max}, maximale Herzfrequenz; HR_{mean}, mittlere Herzfrequenz; RPE, subjektives Belastungsempfinden (6–20 Borg-Skala); * $P < 0,05$, im Unterschied zu GRD.

Der zeitliche Verlauf der absoluten Werte für die im Erholungszeitraum von 10 Tagen gemessenen Parameter wird in Tabelle 3 dargestellt. Hinsichtlich der Sprunghöhe beim CMJ gab es einen Haupteffekt für Zeit ($P < 0,001$, $\eta^2_p = 0,50$, Teststärke = 1,0) und Gruppe, mit einer systematisch geringeren Abnahme in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) im Vergleich zur scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) ($-8,2 \pm 5,4$ % vs. $-14,3 \pm 5,4$ %, $P = 0,017$, $\eta^2_p = 0,25$, Teststärke = 0,70), doch ohne Wechselwirkung beim zeitlichen Verlauf der Erholung zwischen den beiden Gruppen ($P = 0,79$). Die schlechteste Leistung beim CMJ wurde an Tag 1 nach der Intervention erzielt (**Abbildung 2**).

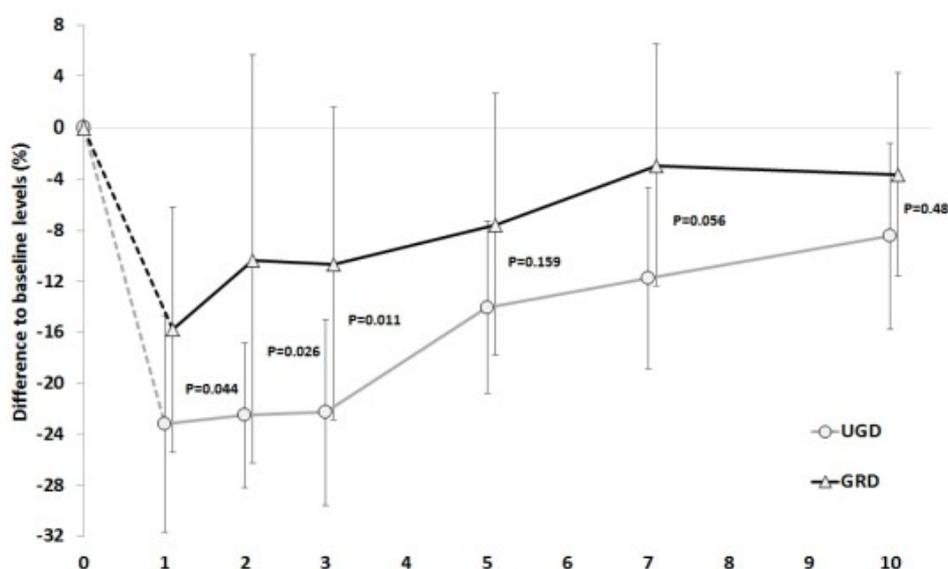
ABBILDUNG 2 | Zeitlicher Verlauf der prozentualen Verringerung hinsichtlich Baseline-Niveau beim Counter Movement Jump (CMJ) im 10-Tages-Zeitraum nach der Intervention. UGD, scheinbar geerdet schlafende Gruppe; GRD, geerdet schlafende Gruppe (Mittelwert \pm SD).



Beim DJ gab es für Sprunghöhe, Bodenkontaktzeit und den Sprungkoeffizienten einen Haupteffekt für Zeit (alle $P < 0,001$, $\eta^2_p = 0,28$ bis $0,88$, Teststärke = $1,0$). Sowohl bei der Sprunghöhe als auch bei der Bodenkontaktzeit wurde kein Haupteffekt für Gruppe festgestellt. Die schlechteste Leistung beim DJ wurde an den Tagen 2 (Höhe und Koeffizient) und 3 (Bodenkontaktzeit) nach der Intervention festgestellt. Beim Sprungkoeffizienten wurde eine Tendenz zu einem Gruppeneffekt ($P = 0,06$) mit einer geringeren Abnahme in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) im Vergleich zur scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) ($-12,2 \pm 10,6$ % vs. $-21,4 \pm 10,6$ %), doch keine Wechselwirkung zwischen Zeit und Gruppe ($P = 0,18$) festgestellt.

Bei der maximalen willkürlichen isometrischen Kontraktion des dominanten Beins wurde ein Haupteffekt für Zeit ($P < 0,001$, $\eta^2_p = 0,49$, Teststärke = $1,0$) und Gruppe ($P < 0,03$, $\eta^2_p = 0,22$, Teststärke = $0,61$) mit einer weniger stark ausgeprägten Leistungsabnahme in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) im Vergleich zur scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) ($-9,5 \pm 16,8$ % vs. $-17,3 \pm 38,3$ %) festgestellt. Die Analyse im Tagesvergleich ergab Wechselwirkungen zwischen Gruppe und Zeit in den ersten drei Tagen mit einer stärker ausgeprägten Erholung in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) im Vergleich zur scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) ($P < 0,05$) (**Abbildung 3**). Für das nicht dominante Bein wurde nur ein Haupteffekt für Zeit festgestellt ($P < 0,001$, $\eta^2_p = 0,49$, Teststärke = $0,61$), ohne Unterschiede zwischen den Gruppen.

ABBILDUNG 3 | Zeitlicher Verlauf der prozentualen Verringerung hinsichtlich Baseline-Niveau bei der isometrischen Maximalkraft des dominanten Beins im 10-Tages-Zeitraum nach der Intervention. UGD, scheinbar geerdet schlafende Gruppe; GRD, geerdet schlafende Gruppe (Mittelwert \pm SD).



Hinsichtlich der Kreatinkinase-Spiegel (CK) wurden Haupteffekte für Zeit ($P < 0,001$, $\eta^2_p = 0,30$, Teststärke = $0,98$) und Gruppe ($P = 0,007$, $\eta^2_p = 0,31$, Teststärke = $0,81$) sowie eine Wechselwirkung zwischen Zeit und Gruppe ($P = 0,001$, $\eta^2_p = 0,26$, Teststärke = $0,95$) festgestellt, die einen geringeren Anstieg in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) im Vergleich zur scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) (310 ± 120 % vs. 760 ± 380 %) und gleichzeitig einen stärker ausgeprägten Anstieg in der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) an den Tagen 3, 5 und 7 zeigen. Die höchsten CK-Spiegel wurden an Tag 5 nach der Intervention gemessen (**Abbildung 4A**). Die individuelle Reaktionsanalyse ergab, dass in der geerdet schlafenden Gruppe kein Teilnehmer einen starken Anstieg des CK-Spiegels (d. h. keine Veränderung von > 20 %) aufwies, wohingegen dies in der scheinbar geerdet schlafenden

Gruppe (UGD) bei 40 % der Teilnehmer (n = 4) der Fall war. In der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) zeigten sogar 25 % (n = 3) keinen Anstieg (also < 3 %) des CK-Spiegels, was bei keinem Teilnehmer der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) der Fall war (**Abbildung 4B**).

In Bezug auf die visuelle Analogskala (VAS) wurde nur ein signifikanter Effekt für Zeit ($P < 0,001$, $\eta^2_p = 0,55$, Teststärke = 1,0), aber kein Haupteffekt für Gruppe ($P = 0,13$) und kein Wechselwirkungseffekt ($P = 0,46$) festgestellt. Die visuelle Analogskala (VAS) hatte an Tag 2 die höchsten Werte. Die Wirkung des geerdeten Schlafens auf den Erholungsprozess nach dem Training wurde bei vier Teilnehmern auf Zell- und Molekül-Ebene genauer untersucht. Im Differentialblutbild (**Abbildung 5**) waren die offensichtlichsten Unterschiede zwischen beiden Gruppen bei der Erythrozytenzahl und den Hämoglobin- und Hämatokrit-Werten ersichtlich, die an den Erholungstagen 2–7 in der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) signifikant anstiegen (jeweils $P = 0,007$, $P = 0,029$ und $P = 0,017$). Diese Veränderungen wurden von einer Abnahme des durchschnittlichen Volumens der roten Blutkörperchen (MCV, $P = 0,024$) begleitet. In der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) blieben diese Parameter dagegen auf Baseline-Niveau. In Bezug auf die durchschnittliche Hämoglobin-Menge pro rotem Blutkörperchen (MCH) wurde kein Unterschied zwischen beiden Gruppen festgestellt. Dies zeigt, dass das Verhältnis von Hämoglobin zu Erythrozyten während des Erholungsprozesses nach intensiver Trainingsaktivität unverändert blieb. In der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) wurde zwischen den Tagen 3 und 7 der Erholungsphase ein leichter anfänglicher Anstieg der Leukozytenzahl (10^3 Zellen pro μl) beobachtet ($P = 0,079$). Zwischen den Erholungstagen 3 und 5 wurde eine ähnliche Tendenz bei den Granulozyten beobachtet ($P = 0,038$), welche die überwiegende Mehrheit der weißen Blutkörperchen darstellen (Lacelle und Cameron, 2015). Interessanterweise wurde in der Erholungsphase zwischen den Tagen 2 und 7 ein signifikanter Rückgang von im Blut zirkulierenden Monozyten in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) festgestellt ($P = 0,039$). Sowohl in der scheinbar geerdet (UGD) als auch in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) sank die Thrombozytenzahl ($10^3/\text{mm}^3$) in der Erholungsphase nach intensiver exzentrischer Muskelbelastung. In der ungeerdet schlafenden Gruppe (UGD) ging die Thrombozytenzahl jedoch früher (zwischen den Tagen 5 und 10, $P = 0,01$) wieder auf Baseline-Niveau zurück als in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD), was darauf hindeutet, dass eine länger andauernde Rekrutierung von Thrombozyten für verletztes Muskelgewebe stattgefunden haben könnte. Für die mittlere korpuskuläre Hämoglobinkonzentration (MCHC) und die Gesamtzahl der Lymphozyten wurden keine signifikanten Veränderungen zwischen beiden Gruppen beobachtet.

TABELLE 3 | Gemessene Testparameter während des 10-tägigen Erholungszeitraums nach der anstrengenden Bergablauf-Intervention in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) und der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) (Mittelwert \pm SD).

	Group	BL (-30')	D ₀ (+5')	D ₁ (24 h)	D ₂ (48 h)	D ₃ (72 h)	D ₅	D ₇	D ₁₀
CMJ height (cm)	UGD	27.4 \pm 7.4	22.9 \pm 6.7***	22.2 \pm 6.2 ^{7,10}	22.1 \pm 5.9 ^{7,10}	22.9 \pm 6.0 ¹	24.2 \pm 6.2 ^{1,2}	24.6 \pm 6.2 ^{0,1,2}	25.1 \pm 6.5 ^{1,2}
	GRD	31.3 \pm 7.5	27.9 \pm 7.3***	27.2 \pm 7.2 ^{7,10}	27.6 \pm 7.8 ^{7,10}	29.0 \pm 8.3 ⁷	29.4 \pm 7.5	30.1 \pm 8.3 ^{1,2,3}	30.2 \pm 7.8 ^{1,2}
DJ height (cm)	UGD	28.3 \pm 5.2	22.2 \pm 5.4*** ^{7,10}	21.2 \pm 4.9 ^{5,7,10}	20.5 \pm 3.9 ^{5,7,10}	23.0 \pm 4.6	25.9 \pm 4.2 ^{1,2}	25.9 \pm 4.5 ^{0,1,2}	26.8 \pm 5.1 ^{0,1,2}
	GRD	34.2 \pm 7.8	28.2 \pm 7.5*** ^{5,7,10}	28.1 \pm 7.4 ^{5,7,10}	28.8 \pm 7.9 ^{5,7,10}	30.8 \pm 9.6	32.0 \pm 9.6 ^{0,1,2}	33.4 \pm 9.0 ^{0,1,2}	32.7 \pm 8.4 ^{0,1,2}
DJ GCT (ms)	UGD	250 \pm 27	272 \pm 42*	276 \pm 50	288 \pm 47 ^{7,10}	292 \pm 53 ¹⁰	274 \pm 43	270 \pm 42 ²	253 \pm 41 ^{2,3}
	GRD	253 \pm 53	274 \pm 70	262 \pm 70	276 \pm 61	274 \pm 74	262 \pm 59	259 \pm 67	256 \pm 59
DJ coeff (cm/s)	UGD	115 \pm 28	85 \pm 29*** ¹⁰	80 \pm 27 ^{7,10}	74 \pm 21 ^{5,7,10}	82 \pm 26 ^{5,7,10}	98 \pm 29 ^{2,3}	99 \pm 27 ^{1,2,3}	110 \pm 31 ^{0,1,2,3}
	GRD	140 \pm 43	110 \pm 42*** ^{5,7,10}	116 \pm 45 ⁷	112 \pm 41 ^{5,7,10}	122 \pm 51 ⁷	129 \pm 50 ^{0,2}	137 \pm 51 ^{0,1,2,3}	134 \pm 45 ^{0,1,2}
MVIC-R (N)	UGD	1713 \pm 507	1235 \pm 496*** ^{5,7,10}	1279 \pm 371 ^{5,7,10}	1334 \pm 427 ^{7,10}	1331 \pm 404 ^{5,7,10}	1483 \pm 480 ^{0,1,3}	1524 \pm 494 ^{0,1,2,3}	1566 \pm 466 ^{0,1,2,3}
	GRD	2029 \pm 749	1574 \pm 595*** ^{2,3,5,7,10}	1737 \pm 712 ⁷	1812 \pm 685 ⁰	1830 \pm 700 ⁰	1847 \pm 641 ^{0,7}	1931 \pm 656 ^{0,1,7}	1885 \pm 592 ⁰
MVIC-L (N)	UGD	1596 \pm 539	1168 \pm 417*** ^{3,5,7,10}	1234 \pm 382 ^{5,7,10}	1314 \pm 399	1356 \pm 382 ⁰	1451 \pm 443 ^{0,1}	1528 \pm 434 ^{0,1}	1520 \pm 507 ^{0,1}
	GRD	1986 \pm 780	1565 \pm 648*** ^{1,2,3,5,7,10}	1690 \pm 714 ^{0,7}	1784 \pm 748 ⁰	1799 \pm 740 ⁰	1846 \pm 727 ⁰	1892 \pm 624 ^{0,1}	1890 \pm 600 ⁰
CK (U · L ⁻¹)	UGD	154 \pm 99	201 \pm 122** ^{5,7}	641 \pm 403 ^{5,7}	548 \pm 383 ^{5,7}	638 \pm 507	1132 \pm 765 ^{0,1,2,10}	653 \pm 671 ^{0,1,2,10}	608 \pm 422 ^{5,7}
	GRD	260 \pm 168	318 \pm 237 ²	874 \pm 503 ¹	482 \pm 291	595 \pm 570	710 \pm 418	465 \pm 233	315 \pm 273
VAS (mm)	UGD	4 \pm 4	37 \pm 21*** ^{2,10}	51 \pm 15 ^{7,10}	69 \pm 17 ^{0,5,7,10}	55 \pm 17 ^{5,7,10}	26 \pm 19 ^{2,3,10}	11 \pm 15 ^{1,2,3}	2 \pm 2 ^{0,1,2,3,5}
	GRD	5 \pm 4	40 \pm 29*** ^{7,10}	53 \pm 26 ^{5,7,10}	65 \pm 20 ^{3,5,7,10}	45 \pm 22 ^{3,5,7,10}	18 \pm 13 ^{1,2,3,7,10}	4 \pm 4 ^{0,1,2,3,5}	2 \pm 2 ^{0,1,2,3,5,7}

BL, Baseline-Untersuchung 30 Minuten vor der Intervention; D0, 5' nach der Intervention; D1, D2, D3, . . . , D10, Tag 1, Tag 2, Tag 3, . . . , Tag 10 nach der Intervention; CMJ, Counter Movement Jump; DJ, Drop Jump; VAS, visuelle Analogskala in Bezug auf Muskelkater; MVIC, maximale willkürliche isometrische Kontraktion des rechten (R) oder linken (L) Beins; *, **, ***, $P < 0,05$, $P < 0,01$, $P < 0,001$ signifikanter Unterschied zwischen Baseline (BL) und D0 (5 Minuten nach der Intervention). ^{0,1,2, . . . ,10}, signifikant zum jeweiligen Tag (0, 1, 2, . . . , 10) nach der Intervention.

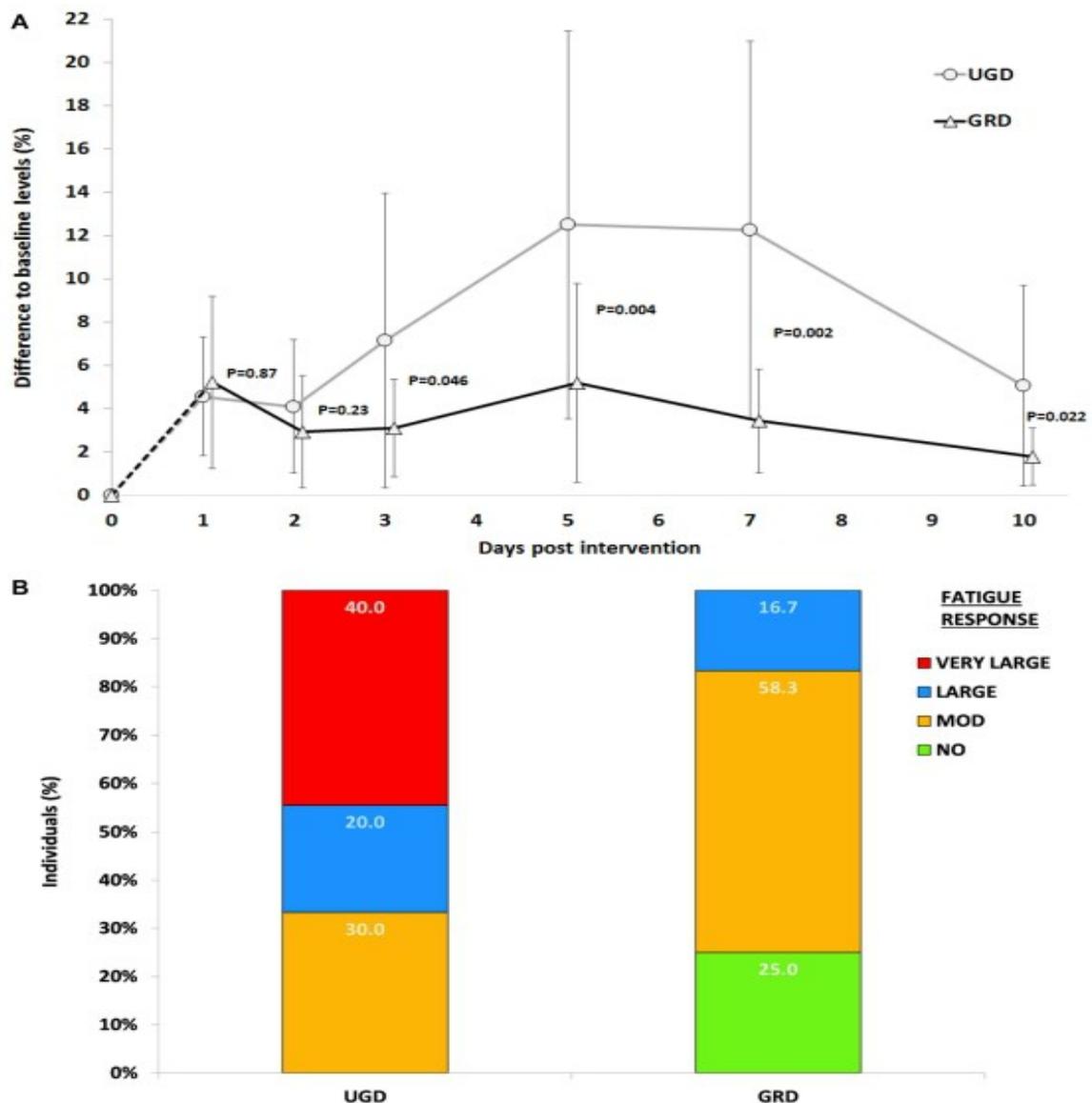


ABBILDUNG 4 | (A) Zeitlicher Verlauf der prozentualen Erhöhung hinsichtlich Baseline-Niveau beim CK-Blutspiegel im 10-Tages-Zeitraum nach der Intervention. **UGD, scheinbar geerdet schlafende Gruppe; GRD, geerdet schlafende Gruppe** (Mittelwert \pm SD). **(B)** Individuelle Reaktionsanalyse für Erhöhungen des CK-Spiegels bei **GRD (geerdetem Schlafen)** und **UGD (scheinbar geerdetem Schlafen)**. [Minimale] Prozentunterschiede werden als Non-Response kategorisiert: $< 3\%$, moderate Reaktion: $3\text{--}10\%$, starke Reaktion: $10\text{--}20\%$ und sehr starke Reaktion $> 20\%$.

Der Wert des C-reaktiven Proteins (CRP) wurde im Studienverlauf überwacht und als Indikator für unabhängige Entzündungsprozesse (z. B. virale oder bakterielle Infektionen) verwendet, die sich auf die

untersuchten Blutwerte auswirken könnten. Die CRP-Werte blieben bei allen vier Probanden unverändert (**Ergänzungstabellen S3, S4**).

Auf Molekül-Ebene stellten wir Veränderungen in den serologischen Entzündungsparametern fest, insbesondere bei den löslichen Zelladhäsionsmolekülen (sCAM) und den Chemokinen (**Abbildung 6**). Das interzelluläre Adhäsionsmolekül 1 (ICAM-1), das auf Epithelzellen exprimiert und an der Zelladhäsion und Ko-Stimulation von Makrophagen, Monozyten und Granulozyten beteiligt ist, blieb in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) im Vergleich zur scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) entweder auf Baseline-Niveau oder war erhöht. Von Tag 1 bis 5 war in der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) eine deutliche Abnahme des sICAM-1-Spiegels (etwa 10 %) zu beobachten ($P = 0,005$). Außerdem war das Zelladhäsionsmolekül sP-Selectin in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) im Vergleich zur scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) herunterreguliert und blieb während des gesamten Studienzeitraums unter dem Baseline-Niveau (etwa 20 % Reduktion; $P = 0,003$). Im Allgemeinen wiesen die mit Entzündung in Zusammenhang stehenden Chemokine, wie das Interferon-gamma induzierte Protein-10 (IP-10) und die Makrophagen-Entzündungsproteine (MIP-1 α und MIP-1 β), in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) niedrigere Werte (jeweils $P = 0,014$, $P = 0,004$ und $P = 0,359$) auf. Für das Makrophagen-Chemoattraktorprotein-1 (MCP-1), das an der Rekrutierung von Monozyten beteiligt ist, sowie das lösliche Zelladhäsionsmolekül sE-Selectin wurden keine signifikanten Veränderungen beobachtet.

Innerhalb der Nachweisgrenze des Testverfahrens war es nicht möglich, im Serum der gesunden Sportler die Chemokine/Zytokine GM-CSF, IFN α , IFN γ , IL-1 α , IL-1 β , IL-4, IL-6, IL-8, IL-10, IL-12p70, IL-13, IL-17A/CTLA-8 und TNF α nachzuweisen.

DISKUSSION

Diese Studie erbrachte sechs zentrale Ergebnisse: (1) Die Laufbandintervention mit Bergablauf führte zu deutlichen erschöpfungsbedingten Veränderungen der gemessenen Parameter, die bereits 5 Minuten nach der Intervention nachweisbar waren. (2) Geerdeter Schlafen führte im Vergleich zu scheinbar geerdetem Schlaf bei mehreren Variablen zu einer weniger stark ausgeprägten Leistungsabnahme. (3) Geerdeter Schlaf führte zu einem viel geringeren Anstieg der Kreatinkinase während der gesamten Erholungsphase verglichen mit scheinbar geerdetem Schlaf. (4) 10 Tage nach der Intervention wurde anhand keines der gemessenen Parameter eine vollständige Erholung festgestellt. (5) Die höchsten Kreatinkinase-Spiegel wurden an Tag 5 festgestellt, wohingegen die größte Abnahme der Sprung- und Kraftleistung an Tag 1 der Fall war und die höchsten Werte auf der visuellen Analogskala (VAS) an Tag 2 nach der Intervention verzeichnet wurden. (6) Eine detaillierte Analyse der Blutproben zeigte, dass geerdeter Schlaf den Erholungsprozess moduliert, (a) indem die Hämokonzentration konstant aufrechterhalten wird, wie die Erythrozytenzahl und die Hämoglobin/Hämatokrit-Werte verdeutlichen, und (b) indem die mit Muskelschäden assoziierten Entzündungsparameter wie IP-10, MIP-1 α und sP-Selectin gesenkt werden.

Es wurde wiederholt gezeigt, dass eine repetitive exzentrische Muskelaktivierung wie beim Bergablauf für verzögert einsetzenden Muskelkater verantwortlich ist. Verzögert einsetzender Muskelkater geht mit der Freisetzung von Muskelproteinen wie Kreatinkinase in den Blutstrom sowie einem länger andauernden Rückgang der muskulären Leistungsfähigkeit einher (Hoppeler, 2016). Beim exzentrischen Training werden die aktivierten Muskeln gedehnt, was zu mechanischen Schäden der Sarkomere, Entzündung, Verletzungen des Sarkolemms sowie Schäden durch reaktive Sauerstoffspezies führen kann (Lovering und Brooks, 2014). Das in dieser Studie verwendete 20-minütige Bergablauf-Protokoll führte bei den meisten der untersuchten Parameter zu deutlichen Leistungsabnahmen und höheren Messwerten

bei Muskelschäden und auf der visuellen Analogskala. Keiner der gemessenen Parameter erreichte nach den 10 Erholungstagen wieder Baseline-Niveau. Daher kann die angewendete Bergablauf-Intervention als gut gewählte Methode betrachtet werden, um Muskelschäden hervorzurufen, die zu deutlichen Leistungsabfällen führen. Das Protokoll kann daher als geeignet betrachtet werden, um die Wirksamkeit verschiedener Arten von Erholungsmaßnahmen zu untersuchen. In diesem speziellen Fall ging es darum zu untersuchen, ob geerdeter Schlaf die Fähigkeit zu schnellerer Erholung verbessern oder Leistungsabfälle im Vergleich zur ungeerdeten Situation verringern kann. Es sei darauf hingewiesen, dass Cheung et al. (2003) und Seidel et al. (2012) zu dem Ergebnis kamen, dass keine Behandlungsstrategie die Muskelerholung tatsächlich gezielt unterstützt oder verbessert habe. Dies verdeutlicht, dass de facto keine überzeugenden evidenzbasierten und praktischen Strategien zur Prävention oder Linderung von verzögert einsetzendem Muskelkater vorhanden sind. Außerdem gibt es keine eindeutigen Nachweise für Behandlungsstrategien, die eine Erholung nach trainingsbedingten Muskelschäden beschleunigen.

Die vorliegende Studie ergab jedoch, dass die geerdet schlafende Gruppe (GRD) geringere Leistungsabfälle beim CMJ, der maximalen Beinkraft (MVIC), eine Tendenz beim DJ-Koeffizienten und einen weniger stark ausgeprägten Anstieg der Kreatinkinase (CK) im Vergleich zur scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) zeigte. Die weniger stark ausgeprägte Abnahme bei Leistungsmessungen (Kraft, Sprungleistung) und der geringere Anstieg des CK-Spiegels in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) könnte auf eine möglicherweise verminderte Blutviskosität (Chevalier et al., 2013; Brown und Chevalier, 2015), eine gesteigerte Blutflussgeschwindigkeit, eine bessere Schlafqualität (Ghaly und Teplitz, 2004) und reduzierte Muskelschäden (Brown et al., 2010; Brown et al., 2015) zurückzuführen sein, wie die Blutuntersuchungen der vorliegenden Studie eindeutig zeigen. Mit Bezug auf Chevalier et al. (2006), Oschman (2007) und Oschman et al. (2015) basiert die zentrale Hypothese zur Erdung auf der Verbindung mit der Erdoberfläche, die mit freien Elektronen gesättigt ist. Durch diesen indirekten oder direkten Kontakt mit der Erde können „mobile“ Elektronen in den Körper wandern. Daher legt Oschman (2007) nahe, dass die auf Erdung basierenden mobilen Elektronen auch Entzündungen vorbeugen oder lindern könnten, was außerdem der Grund für die unbeeinflusste Hämokonzentration und die abgeschwächte CK-Reaktion sein könnte.

Der beobachtete Anstieg der Erythrozytenzahl und der Hämoglobin- und Hämatokrit-Werte im Verlauf der intensiven exzentrischen Muskelbelastung in der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) könnte auf Veränderungen des Plasmavolumens zurückzuführen sein. Die Hämokonzentration nach dem Training ist üblicherweise auf Wasserverlust zurückzuführen (Bloomer und Goldfarb, 2004; Del Coso et al., 2008). Die Hämokonzentration ist auch eine mögliche Erklärung für die erhöhten Kreatinkinase-Spiegel in der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) (Bassini-Cameron et al., 2007). Unsere vorläufigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass geerdeter Schlaf dem Phänomen der Hämokonzentration durch die Verminderung der Blutviskosität und eine verbesserte Durchblutung vorbeugen kann (Chevalier et al., 2013). Es wurde keine Veränderung der Lymphozytenzahl im Blut beider Gruppen erwartet, da Lymphozyten meist mit adaptiven Immunantworten auf fremde Antigene aus Bakterien, Viren und Parasiten im Zusammenhang stehen (Paul und Seder, 1994).

Infolge einer Muskelverletzung erleiden die beschädigten Muskelfasern und andere Muskelzellen an der Läsionsstelle eine Nekrose, die wiederum von verschiedenen infiltrierenden Immunzellen, vor allem Mastzellen und Neutrophilen, entfernt wird (Bentzinger et al., 2013). Charakteristisch für diese frühen Stadien der Muskelregeneration sind außerdem die Aktivierung des Komplementsystems und die Freisetzung proinflammatorischer Zytokine und Chemokine wie TNF- α , IFN- γ , IP-10, und sICAM-1 (Chazaud et al., 2003; Cheng et al., 2008). Als Reaktion auf INF- γ und TNF- α setzen mehrere Zelltypen das Interferon-gamma induzierte Protein-10 (IP-10) frei, das im Blut gemessen werden kann. Die in der

geerdet schlafenden Gruppe (GRD) beobachtete signifikante Abnahme von IP-10 legt nahe, dass geerdeter Schlaf sowohl durch $\text{INF-}\gamma$ hervorgerufene Entzündungsreaktionen als auch die mit IP-10 assoziierte (NK) zellvermittelte Zytolyse abschwächt. Darüber hinaus könnte eine Abnahme im Spiegel des antiangiogenetisch wirkenden IP-10 die Entstehung neuer Blutgefäße und die daraus resultierende Blutzufuhr zum sich regenerierenden Muskel begünstigen (Gotsch et al., 2007).

Im Anschluss an diese frühen Ereignisse der Muskelregeneration werden die Muskelstammzellen aktiviert und andere Immunzellen, besonders Makrophagen und T-Zellen, zum geschädigten Muskelgewebe rekrutiert. Folglich wurde am zweiten Tag nach der Verletzung ein signifikanter Anstieg der Makrophagenzahl beobachtet (Yang und Hu, 2018). Diese Beobachtungen decken sich mit unseren Ergebnissen, die zeigen, dass die beiden Chemokine MIP-1 α und MIP-1 β , die aus Makrophagen entstehen (Petray et al., 2002), in der scheinbar geerdet schlafenden Gruppe (UGD) ab Tag 2 nach der Gewebsverletzung erhöht sind. Unsere Pilotstudie zeigte dagegen einen Rückgang der Spiegel dieser Chemokine in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD), was eine geringere Aktivierung von Makrophagen und somit eine schwächere lokale Entzündung nahelegt.

Unsere Annahme, dass geerdeter Schlaf Entzündungen eindämmt, wird zudem durch den in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) beobachteten allgemeinen Rückgang der Entzündungsparameter gestützt. Bemerkenswerterweise blieb das lösliche Zelladhäsionsmolekül sP-Selectin (Schrijver et al., 2017) in der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) im gesamten Beobachtungszeitraum unterhalb Baseline-Niveau, was darauf hindeutet, dass sich geerdeter Schlaf langfristig positiv auf diesen Entzündungsparameter auswirkt. sP-Selectin findet sich auf aktivierten Endothelzellen und Thrombozyten und ist ein entscheidender Faktor für die Rekrutierung von Leukozyten zu Läsionsstellen. (Cleator et al., 2006). In der geerdet schlafenden Gruppe (GRD) könnte ein Herunterregulieren der sP-Selectin-Aktivierung auf Endothelzellen und Thrombozyten zu einer verminderten Leukozyten-Rekrutierung zu Stellen mit geschädigtem Muskelgewebe führen.

Unser Ergebnis, dass ein anderes lösliches Zelladhäsionsmolekül, nämlich sICAM-1, in der ungeerdet schlafenden Gruppe (UGD) im Vergleich zur geerdet schlafenden Gruppe (GRD) abnahm, stimmte nicht mit anderen Studien überein, die nach einem anstrengenden Training hohe sICAM-1-Plasmaspiegel zeigten. Veränderungen des sICAM-1-Spiegels scheinen jedoch abhängig von der Art des durchgeführten Trainings zu sein, da nach dem Ergometertraining auf dem Fahrrad keine Veränderungen beobachtet wurden (Akimoto et al., 2002).

FAZIT

Es wurde gezeigt, dass geerdetes Schlafen zu schnellerer Erholung und/oder weniger stark ausgeprägten Markern für Muskelschäden und Entzündungen führte. Unsere vorläufigen Ergebnisse der detaillierten Blutanalyse stützen nachdrücklich die Annahme, dass geerdetes Schlafen zentrale Ereignisse in den frühen Stadien der Muskelregeneration sowohl auf Zell- als auch auf Molekül-Ebene moduliert. Auf Grundlage der untersuchten immunologischen Parameter scheinen die modulatorischen Wirkungen von geerdetem Schlaf Entzündungsreaktionen abzuschwächen, die durch trainingsbedingte Muskelschäden hervorgerufen wurden. Geerdetes Schlafen kann als einfache Methode zur Verbesserung der akuten und langfristigen Erholung nach intensiven Übungseinheiten im Trainingsprozess oder nach intensiven Wettbewerben angesehen werden. Basierend auf den Ergebnissen der Pilotstudie ist weitere Forschung nötig, um die Mechanismen hinter den potenziellen Wirkungen von geerdetem Schlaf auf Zell- und Molekül-

Ebene genau aufzuzeigen. Darüber hinaus muss das Ausmaß der Erdung weiter erforscht werden, also wie viele „mobile“ Elektronen beim geerdeten vs. scheinbar geerdeten Schlafen in den Körper wandern. Und schließlich sollten zukünftige Studien untersuchen, ob geerdeter Schlaf Auswirkungen auf Schlafmuster (z. B. die Schlafqualität) hat oder nicht. Eine Verbesserung der Schlafqualität durch geerdetes Schlafen könnte bei Sportlern zu Veränderungen der Leistung und der Stressmarker führen.

AUTORENBEITRÄGE

EM, TS, PP, LA und FF-B: Konzeption und Entwicklung der Experimente. PA und LA führten die Experimente durch. PS, TS und LA analysierten die Daten. TS, PP, EM und LA bereiteten das Manuskript vor. Alle Autoren lasen das Manuskript und gaben die Endfassung frei.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken Dr. Angelika Stöcklinger (Fachbereich Biowissenschaften, Universität Salzburg) für die Entnahme der Blutproben und Mag. Monika Stadlmann (Fachbereich Sport- und Bewegungswissenschaft, Universität Salzburg) für ihre Unterstützung im Labor.

ZUSATZMATERIAL

Das Zusatzmaterial für diesen Artikel kann online unter <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2019.00035/full#supplementary-material> abgerufen werden.

Referenzen

Hinweis zu Interessenkonflikten: Die Autoren erklären, dass die Forschung ohne ein Bestehen von kommerziellen oder finanziellen Verbindungen, die als potenzieller Interessenkonflikt ausgelegt werden könnten, durchgeführt wurde.

Copyright © 2019 Müller, Pröller, Ferreira-Briza, Aglas und Stögl. Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Lizenzbedingungen der Creative Commons Attribution License (CC BY) verbreitet wird. Die Verwendung, Verbreitung oder Wiedergabe in anderen Foren ist gestattet, unter der Voraussetzung, dass der/die ursprüngliche Autor(en) und der/die Urheberrechtsinhaber genannt werden und die Originalpublikation in dieser Zeitschrift gemäß der anerkannten akademischen Praxis zitiert wird. Eine Verwendung, Verbreitung oder Wiedergabe, die nicht diesen Lizenzbedingungen entspricht, ist nicht gestattet.

.....

.....