

Hypoxietraining in natürlicher und künstlicher Höhe

Hypoxic Training in Natural and Artificial Altitude

1. PARACELSUS MEDICAL UNIVERSITY, *University Institute of Sports Medicine, Prevention and Rehabilitation, Salzburg, Austria*
2. UNIVERSITY OF BAYREUTH, *Institute of Sports Science, Bayreuth, Germany*

Zusammenfassung

- › **Viele Ausdauersportler** streben eine Steigerung der (Ausdauer)leistung auf oder nahe dem Meeresspiegel durch Hypoxietraining an, das in natürlicher oder künstlicher Höhe durch drei Hauptkonzepte realisiert werden kann: Aufenthalt und Training in Hypoxie (Live High - Train High), Aufenthalt in Hypoxie und Training in Normoxie (Live High - Train Low) oder Aufenthalt in Normoxie und Training in Hypoxie (Live Low-Train High).
- › **Die wissenschaftliche Evidenz** für diese Konzepte ist erstaunlich unklar, obwohl einige ergogene Anpassungen an hypoxisches Training gut beschrieben sind. Die hämatologische Akklimatisierung durch eine Erhöhung der Hämoglobinmasse wird häufig als wichtigster Faktor angesehen. Sie allein erklärt jedoch nicht die in einzelnen Studien festgestellte Leistungssteigerung. Das deutet darauf hin, dass andere Mechanismen und Confounder auf eine erfolgreiche Trainingsanpassung hinwirken.
- › **Dieser klinische Review** fasst das derzeitige, widersprüchliche Wissen kurz zusammen, listet Confounder auf, und gibt praktische Hinweise zum Monitoring und zur Optimierung des Hypoxietrainings, soweit das durch wissenschaftliche Evidenz gedeckt ist.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Hypoxie, Ausdauerleistung, Wearables, Spitzensport, Ausdauertraining, Hämoglobin, Erythropoese

Einleitung

Mit den olympischen Spielen in Mexiko wurde das Hypoxietraining eine regelmäßig von Eliteausdauersportlern und von zahlreichen nationalen Sportverbänden angewandte Methode, um sich auf Wettbewerbe in der Höhe oder auf Meereshöhe vorzubereiten (2, 22, 37).

Diese Übersicht fokussiert das Ziel des Hypoxietrainings, die Leistung von Ausdauerathleten im Spitzensport auf Meereshöhe durch Hypoxietraining in natürlicher oder simulierter moderater Höhe zu verbessern. Es gibt bereits beträchtliche und weiter anwachsende Fachliteratur zum Thema, allerdings ist die Evidenz keinesfalls schlüssig (z. B. 19, 34).

Unser Ziel ist es, das vorhandene Wissen über Höhenstraining zur Verbesserung der Leistung auf Meereshöhe zusammenzufassen, Widersprüche hervorzuheben und die Leitprinzipien innerhalb der schmalen Evidenzkorridore herauszuarbeiten.

Hypoxie

Hypoxie bezeichnet den Mangel an Sauerstoff auf Gewebeniveau. In gesunden Menschen kann Hypoxie während intensivem Krafttraining auftreten, allerdings typischerweise durch einen Mangel an Sauerstoff in der eingeatmeten Luft. Das kann mit der „natürlichen“ Höhe zusammenhängen, in der der Luftdruck niedriger ist und sich daher der Teildruck für Sauerstoff vermindert (d. h. hypobare Hypoxie).

Auf natürlichem Höhenniveau verändern sich auch andere Umgebungsfaktoren, d. h. niedrigere Temperatur, Feuchtigkeit und Dichte, aber höhere Strahlen- und Ozonbelastung.

„Künstliche“ Höhe wird am häufigsten durch eine erniedrigte Sauerstoffkonzentration in einer ansonsten unveränderten Umgebung bei Umgebungsdruck herbeigeführt (d. h. normobare Hypoxie). Akklimatisierung an natürliche und künstliche Hypoxie verläuft im Allgemeinen sehr ähnlich (29), daher sind Trainingsanpassungen ähnlich, trotz Unterschieden bei beispielsweise Atemfrequenz, Wasserhaushalt und dem Risiko für akute Höhenkrankheit (20).

Hypoxie verursacht ein Abnehmen der maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$), die sich auf ungefähr 6,0-7,5%/1000m Höhe bei nicht akklimatisierten Ausdauersportlern beläuft und ab 300-800m nachweisbar ist (5, 45). Demzufolge nimmt die Leistung bei Wettläufen (d. h. Bewegung die länger als zwei Minuten dauert) um etwa 6,5-7%/1000m nach intensiver Belastung ab.

Menschen können sich an Hypoxie zu einem gewissen Grad anpassen, aber schon bei 2300m Höhe bleibt das unvollständig, so dass die Leistung bei ungefähr 6% unter der auf Normalnull nach drei Wochen Höhenakklimatisierung verbleibt. Trotz der schädlichen Effekte der Hypoxie auf die Leistung, könnten gewisse Aspekte der Höhenakklimatisierung potenziell verbessernd auf die normoxische Leistung wirken.

Allgemeine und leistungsbezogene Aspekte der Akklimatisierung an Hypoxie

Individuelle Reaktionen auf Hypoxie treten nach wenigen Sekunden auf und erstrecken sich über Minuten, Wochen sogar Jahre, je nach Grad der Hypoxie und der Dauer der Belastung.



Article incorporates the Creative Commons Attribution – Non Commercial License. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



QR-Code scannen und Artikel online lesen.

KORRESPONDENZADRESSE:

PD Dr. Gunnar Treff
Paracelsus Medical University
University Institute of Sports Medicine,
Prevention and Rehabilitation
Lindhofstraße 20, 5020 Salzburg, Austria
✉: gunnar.treff@pmu.ac.at

Um Trainingsprogramme zu optimieren und Höhentaining innerhalb einer periodisierten Langzeitherangehenweise effektiv zu nutzen, ist es wichtig, die zeitliche Dynamik der Akklimatisierung, wie in Abbildung 1 dargestellt, in Betracht zu ziehen. Die offensichtliche und beinahe sofortige Reaktion auf Hypoxie ist Hyperventilation, welche einen sehr effektiven Kompensationsmechanismus darstellt, der direkt den arteriellen Sauerstoffgehalt verbessert und für eine höhere Ventilation bei einer gegebenen Ausgangsleistung sorgt. Hyperventilation erhöht nicht nur den alveolären Sauerstoffpartialdruck, sie induziert auch die Alkalose der Atemwege wegen der Reposition des alveolären und arteriellen Kohlendioxidpartialdrucks, wodurch sich eine vorübergehende Verschiebung der Sauerstoffdissoziationskurve nach links ergibt. In moderaten Höhenlagen wird die Alkalose über die Niere innerhalb von vierundzwanzig Stunden kompensiert, zu Lasten einer verminderten Pufferkapazität aufgrund des Verlustes von Wasserstoffbicarbonat. Jedoch ist in moderaten Höhenlagen eine Verschiebung der Sauerstoffdissoziationskurve nach rechts aufgrund der höheren Konzentration von 2,3 Bisphosphoglycerat zu beobachten. Besonders während des Trainings erleichtert die Dissoziation von Sauerstoff aus Hämoglobin in Gewebe und wirkt damit der Beeinträchtigung alveolärer Sauerstoffextraktion entgegen (17).

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass die jungen Erythrozyten, die günstige rheologische Eigenschaften und höhere 2,3 Bisphosphoglycerat aufweisen, bei der Rückkehr auf Meereshöhe nicht hämolysiert werden. Ein substantieller Anstieg von Erholung und eine unter dem Maximum liegende Herzfrequenz stellt eine weitere sehr schnelle Reaktion dar, die die Herzleistung verbessert und mithilft die Sauerstoffversorgung des Gewebes zu erhalten. Diese Reaktion wird durch eine Hypoxie-induzierte Verlagerung des vegetativen Nervensystems zum Sympathikus vermittelt, was eine systemische Reaktion darstellt.

Neueste Daten von 3450m Höhe lassen den Schluss zu, dass diese sympathikotone Reaktion sich bei Ausdauerathleten vermindert, was zu einer beeinträchtigten Akklimatisierung am ersten Tag führt und bei der Trainingsplanung in Betracht gezogen werden muss (28). Herz- und Atemfrequenz sind dann erheblich verändert, deshalb sind diese beiden Variablen nicht länger auf gleiche Weise mit der Trainingsintensität verbunden wie auf Meereshöhe. Eine langsamere Reaktion ist der Schwund des Plasmavolumens um etwa 6% nach einem Tag. Aufgrund dieses Volumenverlusts steigt die Hämoglobinkonzentration um ungefähr 0,6g/dl bei 2500m (1), was einen höheren Anteil an Sauerstoffträgern pro Bluteinheit verursacht, allerdings bemerkenswerterweise keinen Anstieg bei der absoluten Sauerstofftransportkapazität. Im Gegenzug verringert das geringere Blutvolumen die Vorlast im Herzen und infolgedessen das maximale und submaximale Schlagvolumen, wozu auch die verkürzte diastolische Füllungszeit aufgrund der erhöhten Herzfrequenz beiträgt. Beide haben eine negative Auswirkung auf die Herzleistung und folgerichtig auf die maximale Sauerstoffaufnahme (35). Aber diese frühen Reaktionen können nicht völlig die Abnahme des Sauerstoffpartialdrucks im Gewebe kompensieren und eine Stabilisierung der Hypoxie-induzierten Faktoren (HIF, 1α , 2α) vermitteln.

Im Ergebnis wird die Umschreibung und Transkription des Erythropoetin Gens (EPO) stimuliert und innerhalb von zwei Tagen kann eine Zunahme im Serum beobachtet werden, die nach ein bis zwei Tagen Höhenaufenthalt ihren höchsten Stand erreicht. EPO kann in den folgenden Tagen und Wochen der Hypoxieexposition auf Flachlandwerte zurückfallen (44), aber das Ausmaß und der Zeitverlauf scheinen vom Grad der Hypoxie abzuhängen. EPO löst Erythropoese aus und eine steigende Anzahl von Retikulozyten kann im Blut nach drei bis fünf Tagen nachgewiesen werden, wodurch ein absolutes Ansteigen

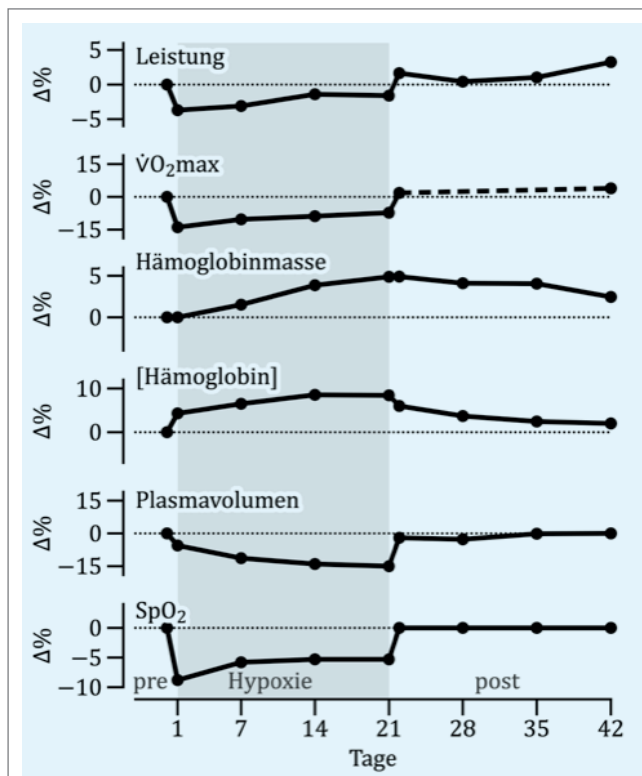


Abbildung 1

Durchschnittlicher zeitlicher Verlauf der Leistung und Adaption während und nach einem dreiwöchigen Hypoxie Training. Daten stellen Annäherungswerte basierend auf der Literatur dar (siehe ergänzendes Material, nur online verfügbar). [Hb]= Hämoglobinkonzentration; Hbmss= Hämoglobinmasse; SpO₂= periphere Sauerstoffsättigung; Leistung= Lauf- oder Schwimmgeschwindigkeit.

an Hämoglobinmasse von ~2% nach zehn Tagen auf 2300m (44) festgestellt werden kann. Ein bedeutender ~4,5% Anstieg darf nach drei Wochen erwartet werden.

Studien, die länger als vier Wochen andauerten, beobachteten keine Plateaubildung bei 2300m (27). Der Anstieg der Hämoglobinmasse ist ein echter Anstieg der Sauerstofftransportkapazität des Blutes. Dies ist wahrscheinlich der Aspekt der Akklimatisierung, von dem am ehesten vermutet wird, dass er die Leistung auf Meereshöhe verbessert, da eine Veränderung von einem Gramm Hämoglobinmasse mit einem Anstieg der maximalen Sauerstoffaufnahme um 4ml/min assoziiert wird (32). Der Anstieg der Hämoglobinmasse ist sehr heterogen und die Daten schwanken von keiner Reaktion bis zu 12% (44). Abbildung 2 listet potenzielle und nachgewiesene Störfaktoren auf, die zu dieser Varianz beitragen.

Außer diesen Effekten, wurden Reaktionen auf das Training in Hypoxie bei einer Vielfalt von Skellettmuskelzellen und anderen Geweben berichtet, indem das mRNA Niveau gemessen wurde (43), welches nicht für sich allein genommen interpretiert werden darf.

Mehrere Aspekte der Akklimatisierung sind mit der durch Hypoxie vermittelten HIF-Stabilisierung verbunden, welche nicht nur EPO ansteigen lässt, sondern auch Auswirkungen auf den Faktor des vaskulären, endothelialen Wachstums hat; auf glycolytische Enzyme, monocarboxylate Transporter 1 und 4 (MCT1 und MCT4), und andere Variablen, die den Stoffwechsel und damit die Leistung beeinflussen (siehe 11 als Review und weitere Quellen). Rezeptoren für EPO selbst können in einer Vielzahl von Geweben gefunden werden, was einen Einfluss von EPO auf Angiogenese nahelegt und möglicherweise eine kardioprotektive Funktion erkennen lässt (siehe Review (46)).

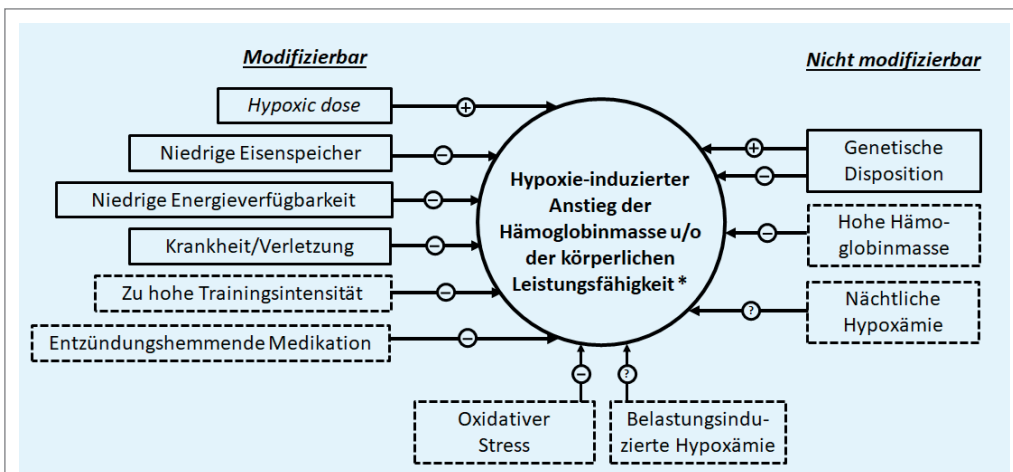


Abbildung 2

Erwiesene und mögliche Determinanten, die eine Zunahme der Hämoglobinmasse und/oder Leistung induzieren. Felder mit gestricheltem Umriss geben widersprüchliche und/oder unklare wissenschaftliche Evidenz an, * geben den Zuwachs in Leistungsfähigkeit nach einem Hypoxietraining an, die auch auf andere Mechanismen als die erhöhte Hämoglobinmasse zurückzuführen ist; + und – weisen auf einen unklaren Zusammenhang hin.

Studien (2). Aufgrund der hohen individuellen Varianz, zahlreicher methodologisch begrenzter Studien und widersprüchlichen Ergebnissen sogar innerhalb der wenigen hochqualifizierten Studien, sehen wir keine belastbaren Beweise für Leistungsverbesserungen nach LH-TH oder LH-TL.

Nichtsdestotrotz wurden auch beträchtliche Leistungsverbesserungen von kombinierten Konzepten – sogenannten LH-THTL angegeben. Hierbei leben und schlafen Athleten in Hypoxie und absolvieren Trainingseinheiten mit niedriger bis mäßiger Intensität in Hypoxie; diese haben den größ-

ten Anteil am Stundenplan eines Ausdauerathleten.

Es ist von Bedeutung zu sehen, dass diese Athleten üblicherweise Trainingseinheiten mit hoher Intensität in Normoxie absolvieren, um eine Verminderung der externen Belastung zu umgehen (27). Um nun die Mehrdeutigkeit der Datenlage zu erklären, sollte erwähnt werden, dass der Zeitpunkt des Testens und/oder Wettkampfs entscheidend für das Ergebnis ist, allerdings sind exakte Daten rar. Nach unserer Erfahrung zeigen einige Athleten einen ersten Leistungshöhepunkt ein bis drei Tage nach der Rückkehr zur Normoxie, gefolgt von einem zweiwöchigen Leistungstief, was den Daten in (21) ähnelt. Die maximale Leistung wird üblicherweise nach ungefähr drei Wochen erreicht, was den wissenschaftlichen Daten über Schwimmer sowohl für Wettbewerb als auch für standardisierte Tests entspricht. Zu diesem Zeitpunkt jedoch ist bereits ~50% der Hämoglobinmasse verloren gegangen, was die Tatsache unterstreicht, dass die Leistungssteigerung nur teilweise einer hämatologischen Akklimatisierung zugeschrieben werden kann.

Hypoxie-Trainingskonzepte

Traditionell reisten Athleten in die Höhe, dort schlafen und zu trainieren. In den letzten dreißig Jahren wurden weitere Konzepte entwickelt, die auch untereinander kombinierbar sind (Abbildung 3).

Live High – Train High (LH-TH)

Die traditionellen LH-TH Trainingslager sind speziell für Ausdauerathleten konzipiert. Athleten schlafen und trainieren hier in der Höhe. Die Trainingslager dauern üblicherweise zwei bis drei Wochen und finden manchmal zwei- bis dreimal pro Saison statt. Die optimale Höhe um Hämoglobinmasse zu erhöhen liegt vermutlich bei 1800-2500m. Aufgrund der Hypoxie nimmt die Leistungskapazität ab, was eine Verminderung der externen Trainingslast nötig macht.

Live High – Train Low (LH-TL)

Finnische und amerikanische Wissenschaftler entwarfen das Live High-Train Low-Konzept in den frühen 1990ern, um die Verminderung der externen Trainingslast und den potentiellen Kraftverlust zu umgehen. Bei LH-TL leben und/oder schlafen Athleten entweder auf natürlicher oder künstlich erzeugter Höhe und trainieren unter normoxischen Bedingungen (d. h. nahe Meereshöhe). Aufgrund logistischer Schwierigkeiten LH-TL in den Bergen durchzuführen (Anfahrtsdauer, etc.) wird im Allgemeinen die künstlich erzeugte Höhe vorgezogen. Allerdings wurde auch die umgekehrte Herangehensweise probiert, d. h. in natürlicher Höhe leben und bei Quasi-Normoxie unter Zugabe von zusätzlichem Sauerstoff trainieren (47). Um eine effektive Erythropoese zu induzieren, sollte die Hypoxieexposition $\geq 14\text{h/Tag}$ für zwei bis drei Wochen dauern bei einer natürlichen oder simulierten Höhe von $\geq 2100\text{m}$ (31).

Nachweis über die Zunahme der Ausdauerleistung nach einem Höhentrainingslager

Bei Spitzensportlern wurde eine Zunahme der Leistung um 5,2% nach LH-TH (~2400m) und um 4,3% nach LH-TL (~2900m) Trainingslagern errechnet, woraus eindeutig hervorgeht, dass solche Trainingskonzepte erfolgreich sein können. Allerdings stützen sich diese Resultate nur auf eine begrenzte Anzahl an

Live Low – Train High (LL-TH)

Beim LL-TH Konzept trainieren Athleten in Hypoxie, während sie die restliche Zeit in Normoxie verbringen. Dieses Konzept hat in den vergangenen Jahren enorm an Popularität gewonnen. Es wird zu medizinischen Zwecken angewandt, um Rehabilitationsergebnisse zu verbessern (24) und bei Athleten, z. B. aus Mannschaftssportarten, die aus praktischen Gründen wie eng getakteten Turnierplänen kaum an Höhentrainingslagern teilnehmen können. Wenigstens drei LL-TH Protokolle werden angewandt (siehe (10)).

1. Kontinuierliches Training in Hypoxie (CHT), bei dem Athleten mindestens zwanzigminütige Trainingsreize von mäßiger Intensität setzen, um die Ausdauerleistung bei niedriger Intensität zu verbessern.
2. Intervall-Training in Hypoxie (IHT), bei dem Athleten Intervalle von mäßiger bis hoher Intensität durchführen, die 0,5-5,0 Minuten andauern. Die Pausen entsprechen zeitlich ungefähr den Belastungsphasen. Ziel ist es die maximale Sauerstoffaufnahme zu verbessern.
3. Repetitives Sprinttraining in Hypoxie (RSH) bei dem Athleten kurze (5-30 Sekunden) Sprints von hoher Intensität mit unvollständiger Erholungszeit (20-180 Sekunden) durchführen. Hierbei zielen die Athleten darauf ab Ermüdung zu reduzieren, die von repetitiven Sprints hervorgerufen wird. Dies kann besonders bei Mannschaftssportarten wie Fußball zum Tragen kommen (3).

Evidenz für die Leistungssteigerung nach Absolvieren eines Live Low-Trainingslagers

Bei keinem dieser Konzepte ist die für eine effektive Erythropoese notwendige Zeitspanne in Hypoxie erreicht worden, folglich wurden keine erythropoetischen Effekte berichtet. Akklimatisierung kann jedoch andere molekulare Veränderungen mit sich bringen, welche nicht notwendiger- aber möglicherweise eine aerobe Anpassung ermöglichen. Diese Änderungen sind z.B. eine erhöhte Citratsynthase-Aktivität, gesteigerte mitochondriale Dichte, ein erhöhtes Verhältnis von Kapillaren pro Muskelfaser, die Zunahme des Muskelfaserquerschnitts, eine erhöhte mitochondriale Biogenese, ein veränderter mitochondrialer Stoffwechsel, die verstärkte Abwehr von oxidativem Stress oder eine verbesserte Pufferkapazität (4, 8).

Verbesserung der Leistung auf Normalnulllevel, die auf CHT oder IHT folgt und deren Kombination mit normoxischem Training, werden kontrovers diskutiert (10, 18). Zudem gibt es keine überzeugende Datenlage für intermittierende hypoxische Belastung (d. h. Hypoxie ohne Training) oder Resistenztraining in Hypoxie.

Auf der anderen Seite ist RSH ein relativ neuer Ansatz, der auf großes wissenschaftliches und praktisches Interesse gestoßen ist. Die Mehrheit der Studien beschreibt eine verbesserte Ermüdungsresistenz (1-5%) ohne Verbesserung der maximalen Sprintleistung (3). Neben diesen Konzepten, die auf Ausdauertraining basieren, könnte das Resistenztraining in Hypoxie (RTE) oder intermittierende Hypoxie Belastung (IHE) für die Athleten von Vorteil bei der Vorbereitung auf vorübergehenden Aufenthalt, Training oder Wettbewerb in der Höhe sein. Allerdings haben wir keine Kenntnis von Daten, die ergogene Effekte auf die Leistung bei Meereshöhe nachweisen.

Wiederholte Anwendung von Hypoxietrainingslagern und Periodisierung

Hypoxietraining ist nicht auf ein einzelnes Trainingslager pro Saison (z. B. vor einem wichtigen Wettbewerb) beschränkt, es kann wiederholt während der Saison angewandt werden, um von vorausgegangener Akklimatisierung zu profitieren und ergogene Effekte anzusammeln. Man spricht hier von einer „Höhenkette“.

Es liegen uns keine detaillierten Daten über die Verbreitung solcher „Höhenketten“ vor, wir gehen jedoch davon aus, dass sie vergleichsweise verbreitet sind und von Spitzensportlern genutzt werden (37). Allerdings sind Daten, die uns erlauben ihre Effektivität zu beurteilen, rar.

Saunders et al. berichten zum Beispiel von einer fortlaufend akkumulierten Zunahme von 10% Hämoglobinmasse bei vier Schwimmern über einen drei- bis vierjährigen Zeitraum, der mehrere hypoxische Aufenthalte umfasste. Diese Daten zeigen allerdings weder wie sich Muskelmasse entwickelte (die eng mit der Hämoglobinmasse korreliert (42)), noch wurden Trainingsdetails oder andere Störfaktoren erwähnt (30). Es gibt jedoch Beweise, dass Höhenakklimatisierung im Sinne der arteriellen

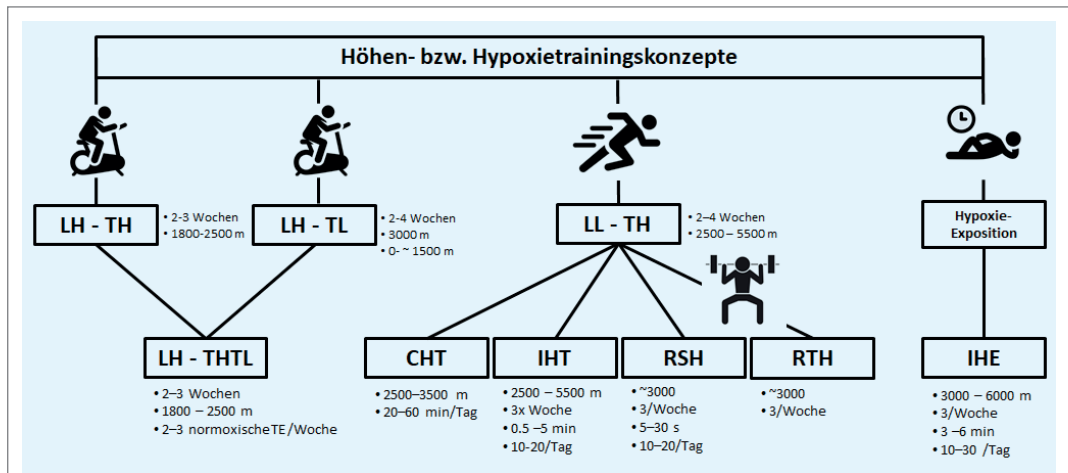


Abbildung 3

Überblick über hypoxische Trainingskonzepte (angepasst von (10, 21)): LH-TL=Live High-Train Low; LH-THTL=Live High-Train High and Low; CHT=kontinuierliches hypoxisches Training; IHT=Intervall hypoxisches Training; IHE=intermittierende hypoxische Belastung in Ruhe; RSH=repetitives Sprinttraining bei Hypoxie; RTE=Widerstandstraining bei Hypoxie.

Sauerstoffsättigung und verbesserter Trainingskapazität bei fünf und einundzwanzig Tagen nach Rückkehr ins Flachland bewahrt werden kann, was sich aber nicht in einem erhöhten Hämoglobinwert widerspiegelt (40).

Stoffwechselanalysen fügten dem Rätsel molekulare Elemente hinzu, die darauf hinweisen, dass eine Adenosin-abhängige „erythrozytisch-hypoxische Erinnerung“ potentiell zu den positiven Effekten beiträgt (38, 41). Im Allgemeinen wurde vorgeschlagen, einen mindestens achtwöchigen Abstand zwischen Höhentrainingslagern einzuhalten, um exzessiver Ermüdung vorzubeugen und das Training vernünftigerweise in den Normoxiephasen zu periodisieren. Allerdings wurden auch kürzere Zeitabstände angegeben (37).

Störfaktoren und praktische Anwendungen

Mehrere Störfaktoren müssen eingeräumt werden, wenn man die Reaktion auf das Training in Hypoxie in wissenschaftlichen Studien und bei individuellen Sportlern interpretiert. Diese Faktoren zu überwachen, zu kontrollieren und zu optimieren stellt den Schlüssel für die praktische und erfolgreiche Anwendung des Hypoxietrainings dar. Dass Eisen in ausreichender Menge vorhanden sein muss ist eine Vorbedingung für die erfolgreiche Erythropoese. Daher ist es unerlässlich, den Eisenstoffwechsel lange Zeit vor dem Einsatz eines Trainings in Hypoxie zu untersuchen und angemessene Ergänzungsmittel in Betracht zu ziehen. In Anlehnung an neueste Empfehlungen repräsentieren Ferritin Konzentrationen <15µg/L den Schwellenwert für parenterale Ergänzungsgaben bei einem schwerwiegenden Eisenmangel der die Erythropoese einschränkt. Falls Ferritin <35µg/L beträgt, sollte ein Sportmediziner kontaktiert werden, um sofortige orale Ergänzungsgaben zu diskutieren. Selbst bei höheren Ferritinkonzentrationen, die im Bereich von 100-130µg/L liegen, wird eine orale Ergänzungsgabe von 100 mg/Tag elementaren Eisens vor und/oder während eines Hypoxietrainingslagers von australischen Experten empfohlen (39). Im Gegensatz dazu berichten andere Forscher nicht von einem Vorteil bei Ferritinkonzentrationen höher als 35µg/L vor der Höhe oder durch Eisenergänzungsgaben in Bezug auf die Zunahme der Hämoglobinmasse bei Ausdauersportlern mit klinisch normalen Eisenspeichern (15). Die Ergebnisse bleiben jedoch kontrovers (12).

Um Gesundheit und Trainingsadaptionsfähigkeit auf Normalnulllevel zu erhalten, ist es unerlässlich, den Energie- ➔

bedarf zu decken und auch den relativen Energiemangel beim Sport zu vermeiden. Das trifft besonders in der Hypoxie zu, wo die Stoffwechselrate im Ruhezustand mit der Höhe und der Zeit in moderater Höhe zunimmt (48). Um den potenziell schädlichen Einfluss von erhöhtem oxidativem Stress in Hypoxie zu verringern (13), wird tatsächlich empfohlen, reichliche Mengen an anti-oxidativer Nahrung (z. B. Orangensaft) in den täglichen Ernährungsplan der Sportler aufzunehmen. Allerdings werden (künstliche) anti-oxidative Ergänzungsmittel derzeit nicht empfohlen, da diese die gewünschten Anpassungen sogar beeinträchtigen könnten. Im Allgemeinen wird eine Verringerung der externen Trainingsbelastung dringend empfohlen und erfolgreiche Trainer stimmen überein, dass die Umsetzung des Trainingsvolumens eine höhere Priorität hat als die Intensität [eigene Beobachtung]. Insbesondere während der ersten Tage bei 3450m haben nicht akklimatisierte ausdauertrainierte Sportler ein höheres Risiko akute Höhenkrankheit zu entwickeln als eine untrainierte Kontrollgruppe (28). Daher ist eine Vorakklimatisierung und/oder eine beträchtliche Verringerung der externen Trainingsbelastung erforderlich.

Der Gesamtverlauf der Akklimatisierung ist teilweise der Reaktion des autonomen Nervensystems zuzuschreiben (36), welche über die Herzfrequenzvariabilität eingeschätzt werden kann, wenn standardisierte Bedingungen zum Tragen kommen (28). Die Sauerstoffsättigung des Blutes ist ein Surrogat der Akklimatisierung welche nicht-invasiv mit Sauerstoffpulsessern überwacht werden kann. Die rasant voranschreitende Entwicklung der tragbaren Technologie, z. B. am Handgelenk getragene Geräte, die regelmäßig von Ausdauerathleten getragen werden, um ihr Training nachzuverfolgen, verspricht eine kontinuierliche Bewertung solcher Maßnahmen (16). Diese Verlaufsüberwachung könnte besonders hilfreich dabei sein die individuelle hypoxische Dosis im Ruhezustand, beim Training, im Schlaf zu quantifizieren, weil ebenso der nächtliche Blutsauerstoffmangel potenziell zur hämatologischen und ventilatorischen Akklimatisierung beiträgt (23).

Ein weiterer potenzieller Einflussfaktor ist die belastungs-induzierte arterielle Hypoxämie, welche einen anhaltenden Rückgang des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks in einer normoxische Umgebung von mindestens 10mmHg (was grob -4% auf einem Pulsoximeter entspricht) vom Ruhezustand zur Belastung bedeutet (25). Derzeit ist unklar wie der Grad der belastungs-

duzierten arteriellen Hypoxämie in Normoxie sich zur Größe bei Hypoxie verhält, falls der eine oder die andere Akklimatisierung begünstigt oder beeinträchtigt, ebenso wie der Beitrag der belastungsinduzierten arteriellen Hypoxämie zur Heterogenität der Anpassung beim Training in Hypoxie (7). Eine Beeinträchtigung der Erythropoese und der Leistung tritt auf, wenn Athleten erkranken oder sich während des Höhentrainings verletzen, infolgedessen nimmt die Hämoglobinmasse nicht zu oder sogar ab (15,44). Nach unserer Erfahrung können nichtsteroidale Schmerzmittel ebenfalls die erwünschten Effekte abschwächen. Schließlich muss beachtet werden, dass die Heterogenität der wissenschaftlichen Evidenz teilweise den nicht berichteten oder unbekanntenen Anwendungen von EPO- oder Blutdoping-Methoden in bestimmten Studien zugerechnet werden kann.

Insgesamt sind wir überzeugt, dass diese Störfaktoren entweder jeder für sich oder in der Kombination beträchtlich zu den heterogenen Ergebnissen in der Fachliteratur beigetragen haben und einen großen Anteil der sogenannten Non-Responder erklären

Fazit

Trotz umfangreicher Fachliteratur fehlen immer noch eine klare Evidenz und praktische Richtlinien wie hypoxisches Training eine Verbesserung der Ausdauerleistung auf Meereshöhe ermöglicht. Was jedoch klar zu sein scheint ist, dass gesunde Athleten ihre Hämoglobinmasse durch Hypoxie bei ausreichender hypoxischer Dosis, Energie- und Eisenverfügbarkeit erhöhen können und folglich ihre Sauerstofftransportkapazität. Allerdings erklärt dieser einfach kontrollierbare Teil der Akklimatisierung die Leistungssteigerung über die einige Studien berichten nur teilweise. Andere Aspekte der nicht-hämatologischen ergogenen Akklimatisierung werden noch unvollständig verstanden, ebenso wie die zahlreichen Störfaktoren, die eine nicht-Adaption an das Training in der Hypoxie erklären können. Wir empfehlen die Störfaktoren – falls möglich – vor, während und nach einer hypoxischen Intervention so gut es geht zu überwachen und zu managen, um eine nachträgliche individuelle Optimierung zu ermöglichen. ■

Angaben zu finanziellen Interessen und Beziehungen, wie Patente, Honorare oder Unterstützung durch Firmen:

Keine

Literatur

- (1) BEIDLEMAN BA, STAAB JE, MUZA SR, SAWKA MN. Quantitative model of hematologic and plasma volume responses after ascent and acclimation to moderate to high altitudes. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2017; 312: R265-R272. doi:10.1152/ajpregu.00225.2016
- (2) BONETTI DL, HOPKINS WG. Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: a meta-analysis. *Sports Med*. 2009; 39: 107-127. doi:10.2165/00007256-200939020-00002
- (3) BROCHERIE F, GIRARD O, FAISS R, MILLET GP. Effects of Repeated-Sprint Training in Hypoxia on Sea-Level Performance: A Meta-Analysis. *Sports Med*. 2017; 47: 1651-1660. doi:10.1007/s40279-017-0685-3
- (4) BROCHERIE F, MILLET GP, D'HULST G, VAN THIENEN R, DELDICQUE L, GIRARD O. Repeated maximal-intensity hypoxic exercise superimposed to hypoxic residence boosts skeletal muscle transcriptional responses in elite team-sport athletes. *Acta Physiol (Oxf)*. 2018; 222: e12989. doi:10.1111/apha.12851
- (5) CLARK SA, BOURDON PC, SCHMIDT W, SINGH B, CABLE G, ONUS KJ, WOOLFORD SM, STANEF T, GORE CJ, AUGHEY RJ. The effect of acute simulated moderate altitude on power, performance and pacing strategies in well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol*. 2007; 102: 45-55. doi:10.1007/s00421-007-0554-0
- (6) DEB SK, BROWN DR, GOUGH LA, MCLELLAN CP, SWINTON PA, ANDY SPARKS S, MCNAUGHTON LR. Quantifying the effects of acute hypoxic exposure on exercise performance and capacity: A systematic review and meta-regression. *Eur J Sport Sci*. 2018; 18: 243-256. doi:10.1080/17461391.2017.1410233
- (7) DURAND F, RABERIN A. Exercise-Induced Hypoxemia in Endurance Athletes: Consequences for Altitude Exposure. *Front Sports Act Living*. 2021; 3: 663674. doi:10.3389/fspor.2021.663674
- (8) FAISS R, LÉGER B, VESIN JM, FOURNIER PE, EGGEL Y, DÉRIAZ O, MILLET GP. Significant molecular and systemic adaptations after repeated sprint training in hypoxia. *PLoS One*. 2013; 8: e56522. doi:10.1371/journal.pone.0056522
- (9) GARVICAN-LEWIS LA, SHARPE K, GORE CJ. Time for a new metric for hypoxic dose. *J Appl Physiol* (1985). 2016; 121: 352-5. doi:10.1152/jappphysiol.00579.2015
- (10) GIRARD O, BROCHERIE F, GOODS PSR, MILLET GP. An Updated Panorama of "Living Low-Training High" Altitude/Hypoxic Methods. *Front Sports Act Living*. 2020; 2: 26. doi:10.3389/fspor.2020.00026
- (11) GORE CJ, CLARK SA, SAUNDERS PU. Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure. *Med Sci Sports Exerc*. 2007; 39: 1600-1609. doi:10.1249/mss.0b013e3180de49d3

- (12) **GOVUS AD, GARVICAN-LEWIS LA, ABBISS CR, PEELING P, GORE CJ.** Pre-Altitude Serum Ferritin Levels and Daily Oral Iron Supplement Dose Mediate Iron Parameter and Hemoglobin Mass Responses to Altitude Exposure. *PLoS One*. 2015; 10: e0135120. doi:10.1371/journal.pone.0135120
- (13) **J WADLEY A, S Svendsen I, Gleeson M.** Heightened Exercise-Induced Oxidative Stress at Simulated Moderate Level Altitude vs. Sea Level in Trained Cyclists. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2017; 27: 97-104. doi:10.1123/ijsem.2015-0345
- (14) **KLEIN M, KAESTNER L, BOGDANOVA AY, MINETTI G, RUDLOFF S, LUNDBY C, MAKHRO A, SEILER E, VAN CROMVOIRT A, FENK S, SIMIONATO G, HERTZ L, RECKTENWALD S, SCHÄFER L, HAIDER T, FRIED S, BORSCH C, MARTI HH, SANDER A, MAIRBÄURL H.** Absence of neocytolysis in humans returning from a 3-week high-altitude sojourn. *Acta Physiol (Oxf)*. 2021; 232: e13647. doi:10.1111/apha.13647
- (15) **KOIVISTO-MØRK AE, SVENDSEN IS, SKATTEBO Ø, HALLÉN J, PAULSEN G.** Impact of baseline serum ferritin and supplemental iron on altitude-induced hemoglobin mass response in elite athletes. *Scand J Med Sci Sports*. 2021; 31: 1764-1773. doi:10.1111/sms.13982
- (16) **SCHIEFER L, TREFF G, TREFF F, SCHMIDT P, SCHÄFER L, NIEBAUER J, SWENSON KE, SWENSON ER, BERGER MM, SAREBAN M.** Validity of Peripheral Oxygen Saturation Measurements with the Garmin Fenix® 5X Plus Wearable Device at 4559 m. *Sensors*. 2021; 21: 6363. doi:10.3390/s21196363
- (17) **MAIRBÄURL H.** Red blood cell function in hypoxia at altitude and exercise. *Int J Sports Med*. 1994; 15: 51-63. doi:10.1055/s-2007-1021020
- (18) **MCLEAN BD, GORE CJ, KEMP J.** Application of 'live low-train high' for enhancing normoxic exercise performance in team sport athletes. *Sports Med*. 2014; 44: 1275-1287. doi:10.1007/s40279-014-0204-8
- (19) **MILLET GP, BROCHERIE F.** Hypoxic Training Is Beneficial in Elite Athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2020; 52: 515-518. doi:10.1249/MSS.0000000000002142
- (20) **MILLET GP, FAISS R, PIALOUX V.** Point: Hypobaric hypoxia induces different physiological responses from normobaric hypoxia. *J Appl Physiol* (1985). 2012; 112: 1783-1784. doi:10.1152/jappphysiol.00067.2012
- (21) **MILLET GP, ROELS B, SCHMITT L, WOODRONS X, RICHALET JP.** Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med*. 2010; 40: 1-25. doi:10.2165/11317920-000000000-00000
- (22) **MUJKA I, SHARMA AP, STELLINGWERFF T.** Contemporary Periodization of Altitude Training for Elite Endurance Athletes: A Narrative Review. *Sports Med*. 2019; 49: 1651-1669. doi:10.1007/s40279-019-01165-y
- (23) **PIALOUX V, BRUGNIAUX JV, FELLMANN N, RICHALET JP, ROBACH P, SCHMITT L, COUDERT J, MOUNIER R.** Oxidative stress and HIF-1 alpha modulate hypoxic ventilatory responses after hypoxic training on athletes. *Respir Physiol Neurobiol*. 2009; 167: 217-220. doi:10.1016/j.resp.2009.04.012
- (24) **PRAMSOHLER S, BURTSCHER M, FAULHABER M, GATTERER H, RAUSCH L, ELIASSON A, NETZER NC.** Endurance Training in Normobaric Hypoxia Imposes Less Physical Stress for Geriatric Rehabilitation. *Front Physiol*. 2017; 8: 514. doi:10.3389/fphys.2017.00514
- (25) **PREFAUT C, DURAND F, MUCCI P, CAILLAUD C.** Exercise-induced arterial hypoxaemia in athletes: a review. *Sports Med*. 2000; 30: 47-61. doi:10.2165/00007256-200030010-00005
- (26) **ROBERTSON EY, SAUNDERS PU, PYNE DB, AUGHEY RJ, ANSON JM, GORE CJ.** Reproducibility of Performance Changes to Simulated Live High/Train Low Altitude. *Med Sci Sports Exerc*. 2010; 42: 394-401. doi:10.1249/MSS.0b013e3181b34b57
- (27) **RODRÍGUEZ FA, IGLESÍAS X, FERICHE B, CALDERÓN-SOTO C, CHAVERRI D, WACHSMUTH NB, SCHMIDT W, LEVINE BD.** Altitude Training in Elite Swimmers for Sea Level Performance (Altitude Project). *Med Sci Sports Exerc*. 2015; 47: 1965-1978. doi:10.1249/MSS.0000000000000626
- (28) **SAREBAN M, SCHIEFER LM, MACHOLZ F, SCHÄFER L, ZANGL Q, INAMA F, REICH B, MAYR B, SCHMIDT P, HARTL A, BÄRTSCH P, NIEBAUER J, TREFF G, BERGER MM.** Endurance Athletes Are at Increased Risk for Early Acute Mountain Sickness at 3450 m. *Med Sci Sports Exerc*. 2020; 52: 1109-1115. doi:10.1249/MSS.0000000000002232
- (29) **SAUGY JJ, SCHMITT L, HAUSER A, CONSTANTIN G, CEJUELA R, FAISS R, WEHRLIN JP, ROSSET J, ROBINSON N, MILLET GP.** Same Performance Changes after Live High-Train Low in Normobaric vs. Hypobaric Hypoxia. *Front Physiol*. 2016; 7: 138. doi:10.3389/fphys.2016.00138
- (30) **SAUNDERS PU, GARVICAN-LEWIS LA, CHAPMAN RF, PÉRIARD JD.** Special Environments: Altitude and Heat. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2019; 29: 210-219. doi:10.1123/ijsem.2018-0256
- (31) **SCHMIDT W, PROMMER N.** Effects of various training modalities on blood volume. *Scand J Med Sci Sports*. 2008; 18: 57-69. doi:10.1111/j.1600-0838.2008.00833.x
- (32) **SCHMIDT W, PROMMER N.** Impact of alterations in total hemoglobin mass on $\dot{V}O_{2max}$. *Exerc Sport Sci Rev*. 2010; 38: 68-75. doi:10.1097/JES.0b013e3181d4957a
- (33) **SCHULER B, THOMSEN JJ, GASSMANN M, LUNDBY C.** Timing the arrival at 2340 m altitude for aerobic performance. *Scand J Med Sci Sports*. 2007; 17: 588-594. doi:10.1111/j.1600-0838.2006.00611.x
- (34) **SIEBENMANN C, DEMPSEY JA.** Hypoxic Training Is Not Beneficial in Elite Athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2020; 52: 519-522. doi:10.1249/MSS.0000000000002141
- (35) **SIEBENMANN C, HUG M, KEISER S, MÜLLER A, VAN LIESHOUT J, RASMUSSEN P, LUNDBY C.** Hypovolemia explains the reduced stroke volume at altitude. *Physiol Rep*. 2013; 1: e00094. doi:10.1002/phy2.94
- (36) **SIEBENMANN C, LUNDBY C.** Regulation of cardiac output in hypoxia. *Scand J Med Sci Sports*. 2015; 25: 53-59. doi:10.1111/sms.12619
- (37) **SOLLI GS, TØNNESSEN E, SANDBAKK Ø.** The Training Characteristics of the World's Most Successful Female Cross-Country Skier. *Front Physiol*. 2017; 8: 1069. doi:10.3389/fphys.2017.01069. doi:10.3389/fphys.2017.01069
- (38) **SONG A, ZHANG Y, HAN L, YEGUTKIN GG, LIU H, SUN K, D'ALESSANDRO A, LI J, KARMOUTY-QUINTANA H, IRIYAMA T, WENG T, ZHAO S, WANG W, WU H, NEMKOV T, SUBUDHI AW, JAMESON-VAN HOUTEN S, JULIAN CG, LOVERING AT, HANSEN KC, ZHANG H, BOGDANOV M, DOWHAN W, JIN J, KELLEMS RE, ELTZSCHIG HK, BLACKBURN M, ROACH RC, XIA Y.** Erythrocytes retain hypoxic adenosine response for faster acclimatization upon re-ascend. *Nat Commun*. 2017; 8: 14108. doi:10.1038/ncomms14108
- (39) **STELLINGWERFF T, PEELING P, GARVICAN-LEWIS LA, HALL R, KOIVISTO AE, HEIKURA IA, BURKE LM.** Nutrition and Altitude: Strategies to Enhance Adaptation, Improve Performance and Maintain Health: A Narrative Review. *Sports Med*. 2019; 49: 169-184. doi:10.1007/s40279-019-01159-w
- (40) **SUBUDHI AW, BOURDILLON N, BUCHER J, DAVIS C, ELLIOTT JE, EUTERMOSTER M, EVERO O, FAN JL, JAMESON-VAN HOUTEN S, JULIAN CG, KARK J, KARK S, KAYSER B, KERN JP, KIM SE, LATHAN C, LAURIE SS, LOVERING AT, PATERSON R, POLANER DM, RYAN BJ, SPIRA JL, TSAO JW, WACHSMUTH NB, ALTITUDEOMICS: THE INTEGRATIVE PHYSIOLOGY OF HUMAN ACCLIMATIZATION TO HYPOBARIC HYPOXIA AND ITS RETENTION UPON REASCENT.** *PLoS One*. 2014; 9: e92191. doi:10.1371/journal.pone.0092191
- (41) **SUN K, LIU H, SONG A, MANALO JM, D'ALESSANDRO A, HANSEN KC, KELLEMS RE, ELTZSCHIG HK, BLACKBURN MR, ROACH RC, XIA Y.** Erythrocyte purinergic signaling components underlie hypoxia adaptation. *J Appl Physiol* (1985). 2017; 123: 951-956. doi:10.1152/jappphysiol.00155.2017
- (42) **TREFF G, SCHMIDT W, WACHSMUTH N, VÖLZKE C, STEINACKER JM.** Total Haemoglobin Mass, Maximal and Submaximal Power in Elite Rowers. *Int J Sports Med*. 2013; 35: 571-574. doi:10.1055/s-0033-1358476
- (43) **VOGT M, PUNTSCHART A, GEISER J, ZULEGER C, BILLETER R, HOPPELER H.** Molecular adaptations in human skeletal muscle to endurance training under simulated hypoxic conditions. *J Appl Physiol* (1985). 2001; 91: 173-82. doi:10.1152/jappl.2001.91.1.173
- (44) **WACHSMUTH NB, VÖLZKE C, PROMMER N, SCHMIDT-TRUCKSÄSS A, FRESE F, SPAHL O, EASTWOOD A, STRAY-GUNDERSEN J, SCHMIDT W.** The effects of classic altitude training on hemoglobin mass in swimmers. *Eur J Appl Physiol*. 2013; 113: 1199-1211. doi:10.1007/s00421-012-2536-0
- (45) **WEHRLIN JP, HALLEN J.** Linear decrease in $\dot{V}O_{2max}$ and performance with increasing altitude in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol*. 2006; 96: 404-412. doi:10.1007/s00421-005-0081-9
- (46) **WENGER RH, KURTZ A.** Erythropoietin. *Compr Physiol*. 2011; 1: 1759-1794. doi:10.1002/cphy.c100075
- (47) **WILBER RL.** Current trends in altitude training. *Sports Med*. 2001; 31: 249-265. doi:10.2165/00007256-200131040-00002
- (48) **WOODS AL, SHARMA AP, GARVICAN-LEWIS LA, SAUNDERS PU, RICE AJ, THOMPSON KG.** Four Weeks of Classical Altitude Training Increases Resting Metabolic Rate in Highly Trained Middle-Distance Runners. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2017; 27: 83-90. doi:10.1123/ijsem.2016-0116