

UPDATE HÖHENTRAINING



*Physiologie
Konzepte
Empfehlungen*

IAT[®]
Institut für Angewandte
Trainingswissenschaft
Forschung für den Leistungssport

Björn Sterzing & Dr. Axel Schürer
Fachgruppe Skilanglauf
2021

Institut für Angewandte Trainingswissenschaft

Fachbereich Ausdauer
Fachgruppe Skilanglauf

Björn Sterzing

Institut für Angewandte Trainingswissenschaft
Ein Institut im Verein IAT/FES e. V.
Marschnerstr. 29
04109 Leipzig

Telefon +49 341 4945-173
Fax +49 341 4945-400
E-Mail sterzing@iat.uni-leipzig.de
Web <http://www.sport-iat.de>

Dr. Axel Schürer

Institut für Angewandte Trainingswissenschaft
Ein Institut im Verein IAT/FES e. V.
Marschnerstr. 29
04109 Leipzig

Telefon +49 341 4945-193
Fax +49 341 4945-400
E-Mail schuerer@iat.uni-leipzig.de
Web <http://www.sport-iat.de>

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALTSVERZEICHNIS

	Physikalische Begriffe und Grundlagen von Höhenlagen	5
	Kategorisierung der Höhenregionen	7
1	Höhenbedingte Anpassungsprozesse aus physiologischer Sicht	8
	1.1 Kardiopulmonale Auswirkungen / Anpassungen des Atmungssystems	8
	1.2 Auswirkungen auf den Säure-Basen Haushalt	10
	1.3 Hämodynamische Auswirkungen	11
	1.4 Zusammenhang zwischen Blutvolumen und Flüssigkeitshaushalt.....	14
	1.5 Auswirkungen auf die Muskulatur	15
	1.6 Zum Phänomen der Responder / Non-Responder.....	16
	1.7 Zusammenfassung – Physiologie Fakten	17
2	Anpassungen und Training in der Höhe	19
	2.1 Konzepte im Höhenttraining	23
	2.2 Zusammenfassung der Konzepte	28
3	Planung und Gestaltung eines Höhenttrainingslagers	29
	3.1 Periodisierung im Höhenttraining / Modelle im Höhenttraining.....	30
	3.2 Phasen nach dem Höhenttraining / Rückanpassung	35
	3.3 Höhengedächtnis – hypoxic memory	37
	3.4 Trainingssteuerung / Monitoring im Höhenttraining	38
4	Grundlagen der Sporternährung in mittleren Höhenlagen.....	40
5	Schlussfolgerung – Konzepte und Empfehlungen.....	43
6	Literaturverzeichnis.....	45

Zielstellung des Artikels

Das Leben und Trainieren auf unterschiedlichen Höhenlagen, mit den daraus resultierenden Auswirkungen auf den Körper des Leistungssportlers ist seit den Olympischen Spielen von Mexiko 1968 in das Interesse der Trainings- und Wettkampfsteuerung gerückt. Mit Beginn der 90er Jahre begann eine weltweit intensive Forschung zur Thematik Höhentaining. Mit Blick auf die internationale Fachliteratur bzw. der Datenbank: Pubmed finden sich zum Suchbegriff „altitude training“ im Jahre 1990 gerade einmal 23 Studien, demgegenüber stehen 305 Studien im Jahre 2020. Für diese Zusammenstellung wurden Einzelstudien, Reviews sowie Fachbücher der Höhenmedizin und der Belastungsphysiologie verwendet.

Höhentaining ist im Ausdauersport weiterhin sehr populär, jedoch ist die Wirkung individuell verschieden, manchmal sogar umstritten. Einerseits werden durch den Höhenreiz echte physiologische Reaktionen ausgelöst, aus denen nicht zwangsläufig Leistungsverbesserungen resultieren, andererseits machen Wettkämpfe in der Höhe eine Höhenvorbereitung im Sinne der Akklimatisation unverzichtbar.

Vor dem Hintergrund, dass die Skilanglaufwettbewerbe bei den Olympischen Winterspielen in Peking 2022, die auf einer Meereshöhe von 1640 - 1963m stattfinden werden (National Cross-Country Skiing Centre Zhangjiakou, ca. 180km nordwestlich von Peking), ist es notwendig die Thematik Höhentaining erneut in den Fokus der Überlegungen zu rücken.

Die folgenden Inhalte beziehen sich zum größten Teil auf die Höhenregionen der geringen bis mittleren Höhen, die eine definitionsgemäße Variation von 500 - 2000m bzw. 2000 - 3000m aufweisen.

Dieser Artikel ist in zwei Hauptbereiche gegliedert. So wird im ersten Teil das Verhalten und die Reaktionen physiologisch relevanter Parameter bei Ankunft oder längerem Aufenthalt in mittleren Höhenlagen aufgezeigt. Im Zweiten Teil soll das Manuskript literaturbasierte, trainingsmethodische sowie praxisorientierte Erkenntnisse oder Einblicke zu den gängigen Konzepten als auch zu neuen Tendenzen und Entwicklungen im Höhentainings geben.

Es werden Empfehlungen zur Strukturierung eines Höhentainings inkl. Vor- und Nachbereitungsphase (für die Sportart Skilanglauf) vorgestellt. Für einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn wurden vereinzelt Studien aus der nahestehenden Sportart Laufen oder aus dem Radsport herangezogen. Im Folgenden ausgenommen sind die Ausdauerportarten Schwimmen / Rudern / Kanu sowie die Mannschafts- und Kraftsportarten, da hier oftmals andere sportartspezifische Herangehensweisen und Auffassungen bestehen.

Am Ende einzelner Abschnitte / Teilabschnitte werden kurze „Merke-Fakten“, Beispiele oder Tipps, für den Praxisalltag formuliert.

Physikalische Begriffe und Grundlagen von Höhenlagen

Hypoxie: Als Hypoxie wird ein Mangel an Sauerstoff in Zellen bzw. Organen des Körpers bezeichnet (hypo =unter, Oxygenium = Sauerstoff).

Hypobare Hypoxie: Ein Aufstieg oder Training in natürlichen Höhen entspricht dieser Situation. Bei zunehmender Höhe sinkt bzw. fehlt der notwendige Druck des Flachlandes, um das Sauerstoffmolekül aus der uns umgebenden Mischluft ($O_2=21\%$, $N_2= 78,1\%$, Edelgase= $0,9\%$) über die Atemwege in den Körper zu pressen.

Normobare Hypoxie: Bei dieser, von außen steuerbaren Form, wird mittels einer Technologie (Generator) eine künstliche Hypoxie erzeugt. Der Sauerstoffanteil / die Sauerstoffkonzentration in der Umgebung wird bei unverändertem Luftdruck verringert, z. B. durch Zufuhr von Stickstoff, Lachgas oder Kohlendioxid. Mit dieser Methode können verschiedene Höhenlagen simuliert werden (Buhl, o.J).

Gesamtluftdruck / Gesamtbarometerdruck: Setzt sich aus verschiedenen Drücken, die die einzelnen Gase ausüben, zusammen. Sie werden Partialdrücke genannt.

Sauerstoffpartialdruck (PO_2) oder Sauerstoff-Teildruck: Der Sauerstoffpartialdruck entspricht dem Anteil des Sauerstoffs am Gesamtdruck innerhalb eines Gasgemisches. Bei Trainingseinheiten oder Wettkämpfen in natürlichen Höhenlagen sinkt der PO_2 mit zunehmender Höhe proportional zum abnehmenden Luftdruck und das Blut wird immer weniger mit Sauerstoff gesättigt. Als Reaktion darauf leitet der Körper verschiedene Kompensationsmechanismen wie z.B. eine gesteigerte Atmung ein (Buhl, o.J.). Durch eine gezielte Anpassung (Akklimation) ist der Organismus in der Lage, schrittweise die Verminderung des PO_2 zu tolerieren.

Der Gesamtluftdruck auf Meereshöhe beträgt 760 mmHg oder 101 kPa oder rund 1 bar. Da Sauerstoff einen Anteil von 21% an der Atemluft hat (21% von 760mmHg), beträgt der PO_2 auf Meereshöhe ca. 160mmHg oder 0,21 bar. Übertragen auf ein Höhentraining auf 2000m ü.M beträgt der PO_2 noch ca. 125mmHg oder 0,17 bar. Wird z.B. ein Trainingslager auf dem Dachstein (2500-2600m ü.M.) durchgeführt, ist der PO_2 noch weiter herabgesetzt, wodurch das Blut grundsätzlich noch weniger mit Sauerstoff gesättigt ist. Der PO_2 unterliegt Schwankungen, die auf die geographische Lage, Temperatur und Luftfeuchtigkeit zurückzuführen sind.

Der **arterielle Sauerstoff-Partialdruck** (PaO_2) ist der Teildruck (Partialdruck) des im arteriellen Blut gelösten Sauerstoffs. Er beträgt auf Meereshöhe etwa 70-90 mmHg. und sinkt altersabhängig. Das Hämoglobin ist bei einem PaO_2 von 75 mmHg vollständig sauerstoffgesättigt, ein Liter Blut transportiert ≈ 200 ml O_2 (Hüfner'sche Zahl). Ab einer Höhe von 2000 - 2500m sinkt der PaO_2 auf ca. 60 mmHg. Das entspricht einer Sauerstoffsättigung des Blutes von 90% oder etwas weniger. Der in der Literatur verwendete Fachbegriff ist die arterielle Sauerstoffsättigung (SaO_2) des Blutes. Sie sagt aus, zu wie viel Prozent das vorhandene Hämoglobin aktuell mit Sauerstoff gesättigt ist. Bei einem normalen arteriellen PaO_2 beträgt die Sauerstoffsättigung ca. 97% (Normalwerte für Gesunde 95-99%).

Damit der Körper diese besondere Situation kompensieren kann, werden als Erstes verschiedene Reaktionen des Atmungs- sowie des Herz-Kreislauf-Systems eingeleitet. Sinkt der Sauerstoffgehalt in der Atemluft (Bsp.: Höhentrainingslager), dann sinkt auch die Sauerstoffbeladung der roten Blutkörperchen in der Lunge und somit die Sauerstoffsättigung (SaO_2) im Blut. Als unterer Grenzwert für therapeutischen Maßnahme wird üblicherweise eine SaO_2 von 90% angegeben. Es wird empfohlen, die SaO_2 zu Beginn eines Höhent Aufenthaltes bei höhen-sensiblen Athleten zu überwachen bzw. zu kontrollieren (Wonisch et al., 2017; Tomasits & Haber 2016, Oczenski, 2012; Küpper et al., 2010).

MERKE

Der vorhandene Sauerstoffanteil der Außenluft von 21% ist praktisch in allen Höhen als identisch anzusehen aber der **Sauerstoffgehalt in %** sinkt mit zunehmender Höhe aufgrund des erheblich abfallenden Luftdrucks (vgl. Abb. 1). Daraus resultieren ein absinkender PO_2 , ebenso der Abfall des PaO_2 inklusive einer verringerten Sauerstoffsättigung des Blutes (Wonisch et al., 2017).

MERKE

Subjektiv wird die Luft als „dünner“ wahrgenommen, dies liegt ausschließlich an den sich ändernden physikalischen Größen.

Bsp.: Trainieren in Höhenlagen von 1500m - 2500m sorgt für eine Abnahme der Sauerstoffsättigung im Blut auf 90% oder weniger. Der O_2 -Gehalt in der Einatemluft liegt auf 2000m nur noch bei ca. 15-16%. Nur allein diese Gesetzmäßigkeiten des Höheneinflusses verursachen kurzfristige (Stress)-Reaktionen der Organsysteme des Leistungssportlers.

Bsp.: Im Vergleich zweier Sportler, einer mit normaler Blutmenge von ca. 6l Blut, werden 1200ml O_2 transportiert. Dem gegenüber einem anderen Sportler mit nicht festgestellter Anämie (Blutarmut, z.B. 5,5l Blut). Bei ihm werden 1100ml O_2 transportiert. Von vorneher ein wird hier klar, mit 10% weniger Sauerstofftransport wirkt die Höhensituation bereits erschwerend, unabhängig von anstehenden Trainingseinheiten.

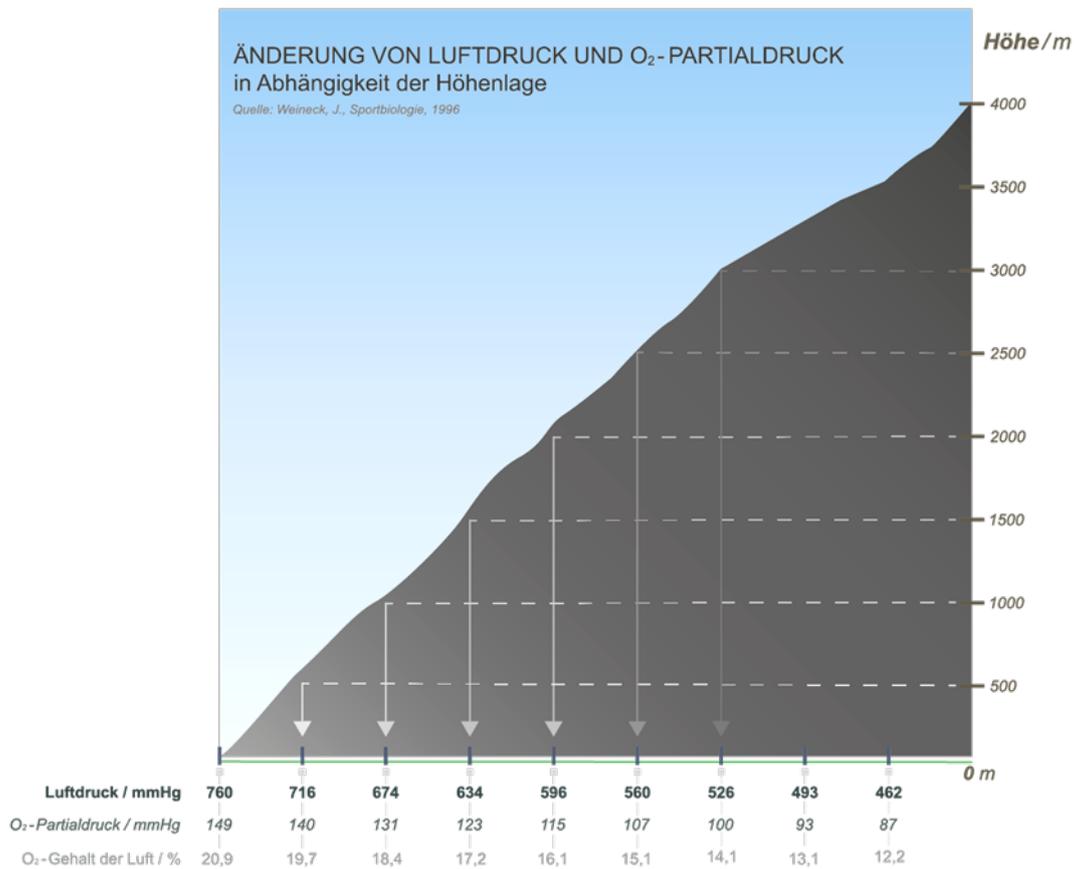


Abb. 1. Verhalten von Luftdruck (mmHG), Sauerstoffpartialdruck (mmHG) und Sauerstoffgehalt der Luft (in %) in Abhängigkeit der Höhenlage (in m) von 0m bis 4000m Höhe (eigene Grafik, Daten aus: Weineck, 1996)

MERKE

Die Mehratmung (Hyperventilation) ist der wichtigste und der am schnellsten einsetzende Anpassungsmechanismus bei Sauerstoffmangel im Körper des Sportlers. Um bei körperlicher Anstrengung auf 2500m dieselbe Menge Sauerstoff wie im Flachland einzusatmen, muss die Atemleistung um 35% ansteigen.

Kategorisierung der Höhenregionen

Aufenthalte in geringen Höhen wie z.B. auf 700 oder 800m führen bei Hochleistungssportlern der Sportarten Skilanglauf, Biathlon und Nordische Kombination zu keinerlei Höhenanpassungen. Etwaige Anpassungen treten erst ab einer Höhe von 1500m und darüber auf. Mit Blick auf die wissenschaftliche Datenlage wird deutlich, dass das sportmethodisch wirksame Höhenttraining erst ab 1600 m beginnt und bei ca. 3000 m endet. Zur klaren Abgrenzung der unterschiedlichen Höhenlagen werden die Definitionen von Bärtsch & Saltin (2008) verwendet. Sie bilden die Grundlage der im Text folgenden Kategorisierungen der Höhenregionen:

- 1) *Nahe Meereshöhe* (0 - 500m) -- keine höhenbedingten Folgen auf die Leistungsfähigkeit
- 2) *Geringe Höhe* (500 - 2000m) -- Sofortanpassung, akute Effekte werden ausgelöst, bei hochtrainierten Athleten kann die Leistungsfähigkeit insbesondere über 1500m beeinträchtigt sein
- 3) *Mittlere Höhe* (2000 – 3000m) -- Höheneffekte bei Nicht- Akklimatisierten können sich z.B. in Schlafproblemen oder Höhenkrankheit äußern, die aerobe Ausdauerleistung sinkt deutlich, Wiederherstellung nach Akklimatisations-Phase
- 4) *Große Höhe* (3000 – 5500m) -- unbedingte Akklimatisation zur Prävention von Höhenkrankheiten nötig, Sauerstoffsättigung im Blut sinkt unter 90% - kritischer Wert, führt in der Folge zu mangelndem Sauerstoffgehalt im Blut (Hypoxämie), auch nach Akklimatisation besteht eine reduzierte Leistungsfähigkeit
- 5) *Extreme Höhe* (über 5500m) -- keine vollständige Akklimatisierung mehr möglich, kurzer Aufenthalt nur für gesunde und gut trainierte Personen

1 Höhenbedingte Anpassungsprozesse aus physiologischer Sicht

1.1 Kardiopulmonale Auswirkungen / Anpassungen des Atmungssystems

Der entscheidende Faktor während eines Höhentrainings ist der Sauerstoffmangel im Organismus. Wie bereits beschrieben, fällt in der Höhe zuerst der arterielle Sauerstoff-Partialdruck, was zu einer reduzierten Sauerstoffsättigung im Blut führt. Um das Sauerstoffdefizit auszugleichen folgt als Akutreaktion eine Steigerung der Atemfrequenz. Dadurch steigt das Atemminutenvolumen und der akute Sauerstoffmangel kann ausgeglichen werden (Buhl, o.J.; Tomastis & Haber, 2016) Diese Reaktion wird als ventilatorische Akklimatisation bezeichnet (engl.: HVR = hypoxic ventilatory response, Luks et al., 2021).

Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}), ein wichtiger Parameter zur Bewertung der aeroben Leistungsfähigkeit, nimmt ab 1500 bis 2000m kontinuierlich ab. (vgl. Abb. 2) Als akute Anpassung kommt es in den ersten 1-2 Tagen zunächst zu einem Leistungsverlust im Bereich der VO_{2max} , dieser beträgt pro 100 Höhenmeter ca. 1%, d.h. in 3000m Höhe ist die VO_{2max} um ca. 15% geringer (Tomastis & Haber, 2016).

Mit zunehmenden Höhenaufenthalt (x Tagen, 2. und 3. Woche) ist die Leistungseinbuße aber wieder rückläufig und als Form der chronischen Anpassung nimmt die VO_{2max} sogar leicht zu. Sie liegt jedoch immer noch unter der vom Meeresniveau (Wehrlin et al.; 2016). Ergänzend wird angeführt, dass vereinzelte Daten aus tieferen Höhenlagen >1000m ü.M. zeigen, dass die VO_{2max} dort ebenfalls reduziert sein kann, die Unterschiede diesbezüglich jedoch sehr individuell ausfallen und auf Studien aus den 90er Jahren zurückgehen (Wehrlin et al., 2016).

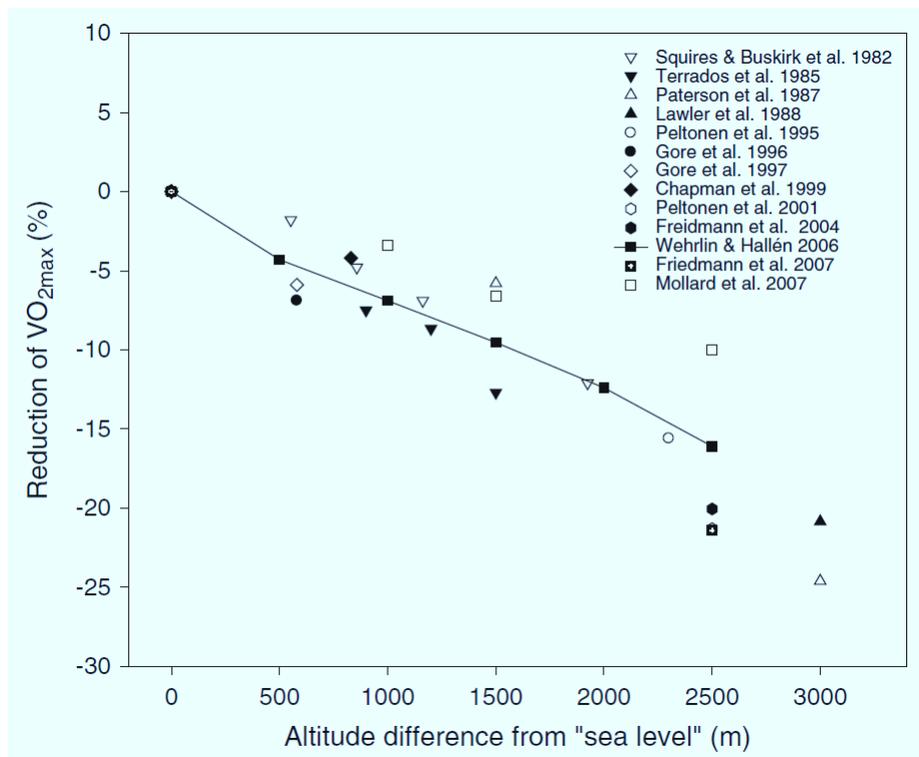


Abb. 2. Abnahme der VO₂max in % (Reduction of VO₂max in %) mit zunehmender Höhe, ausgehend von den Werten auf 0m Meereshöhe (Altitude difference from sea level in m) (Wehrlin et al.; 2016)

Im Herz-Kreislauf-System nimmt nahezu gleichzeitig die Herzfrequenz, das Schlagvolumen und die Kontraktionsgeschwindigkeit des Herzens zu. Daraus resultiert ein um bis zu 20 % gesteigertes Herzminutenvolumen (HMV) in Ruhe und während submaximaler Belastungen (Bärtsch & Gibbs, 2007).

Mit zunehmender Dauer des Höhengaufenthaltes verringert sich das HMV auch während submaximalen Belastungen gegenüber den Werten bei akuter Hypoxie, was als Folge der Akklimatisierung im Sinne einer ökonomisierten Herzleistung gewertet werden kann.

Die damit verbundenen Anpassungen sind z.B. in einer absinkenden Ruheherzfrequenz erkennbar (vgl. Abb. 3, rechts und links).

MERKE

Übertragen auf Trainingspraxis, bedeutet das: Die gleiche Belastung stellt anfänglich eine intensivere kardiale Belastung dar. Der Ausgleich dieser erfolgt durch eine Zunahme des Atemminutenvolumens und der Herzfrequenz.

MERKE

Möglichkeiten des Trainings- oder Regenerations-Monitorings sollten genutzt werden wie z.B. die Kontrolle / Erfassung der Ruheherzfrequenzen oder die Überwachung der Sauerstoffsättigung bei ausgewählten Athleten oder bei Athleten die Aufenthalte in der Höhe in der Vergangenheit weniger gut toleriert haben.

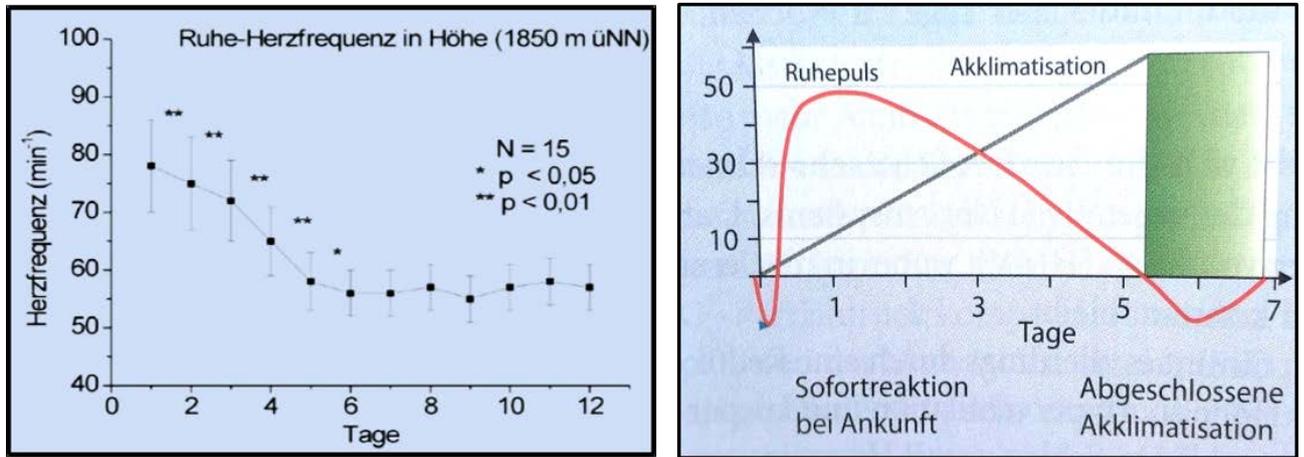


Abb. 3. **links:** Verlauf der Ruheherzfrequenz während einer 12-tägigen Skilanglaufausbildung in einer Höhenlage von 1850m Malloja, Schweiz (Hottenrott & Urban, 2011)
rechts: Anstieg der Herzfrequenz nach Ankunft in der Höhe, die sich in den folgenden Tagen wieder an den Ruheausgangswert annähert (x-Achse), Parallel dazu verläuft die Akklimatisation. Erst wenn der Ruhepuls wieder deutlich rückläufig ist, befindet sich der Körper im „grünen Bereich“. (Küpper et al., 2010)

1.2 Auswirkungen auf den Säure-Basen Haushalt

Durch ein gesteigertes Atemminutenvolumen in Folge der Hyperventilation werden Veränderungen im Säure-Basen-Haushalt des Blutes ausgelöst. Unter Höhenbedingungen wird anfangs mehr CO₂ abgeatmet und der arterielle PCO₂ sinkt. Infolgedessen wird der pH-Wert des Blutes in Richtung „basisch“ erhöht (bis ca. 7,45 in mittleren Höhen). Dieser Vorgang wird als respiratorische Alkalose bezeichnet (Wonisch et al., 2017).

Während der Organismus bestrebt ist das Säure-Basen Gleichgewicht wiederherzustellen, reagiert er durch die vermehrte Ausscheidung von Bikarbonat über die Nieren. Dies hat zur Folge, dass die Alkalose wieder kompensiert wird und sich der pH-Wert zurück in den neutralen Bereich reguliert (Limmer, de Marees & Platen, 2020).

Aufgrund der reduzierten Bikarbonat-Konzentration sinkt die Pufferkapazität des Blutes, wodurch bereits bei submaximalen Beanspruchungen eine stoffwechselbedingte Übersäuerung des Blutes (metabolische Azidose) auftritt. Bei einem Aufenthalt in mittleren Höhen normalisieren sich diese Vorgänge innerhalb von 24-48h (Maibäurl, 2000; Limmer, de Marees & Platen, 2020). Grundsätzlich bleibt die Pufferkapazität in der Höhe vermindert; kann aber nach Höhengaufenthalt verbessert sein (Villiger et al., 2005; Friedmann, 2000).

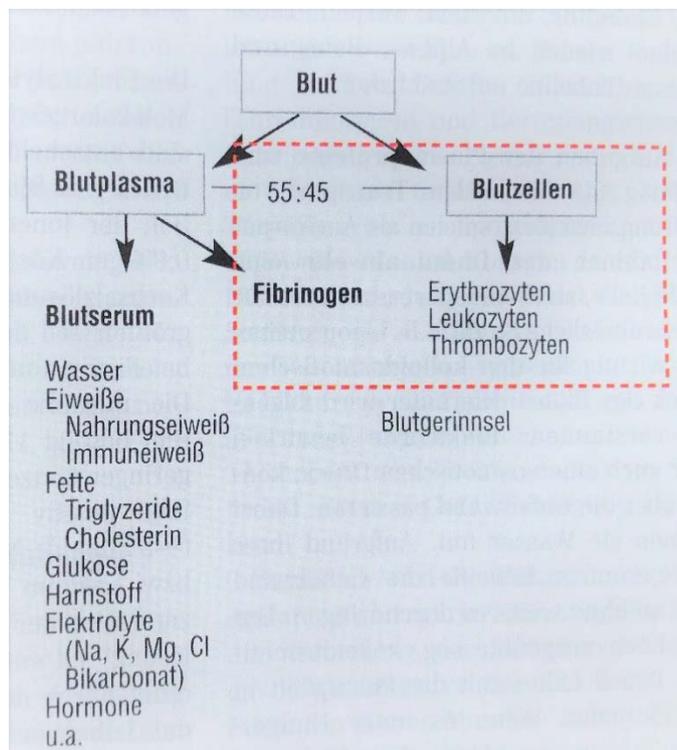
MERKE

Die Fähigkeit des Körpers „saure“ Stoffwechselprodukte wie z.B. Laktat abzapuffern sinkt. Dies sollte v.a. in den ersten Tagen des Höhengaufenthaltes berücksichtigt werden. Unter Beachtung dieser Zusammenhänge, sollte anaerobes Training in den ersten Tagen eines Höhentrainingslagers nicht eingesetzt werden. Grundsätzlich gilt: Anaerobes Training in Höhe nur mit Vorsicht bzw. in guter Abstimmung mit dem Athleten inkl. seines Trainingszustandes einsetzen.

1.3 Hämodynamische Auswirkungen

Das Blutvolumen des Menschen beträgt zwischen 5 und 6l und wird in Abhängigkeit des Körpergewichts angegeben (ml/kg/KG). Es besteht zu 46% aus festen Anteilen, den Blutzellen (oder Blutkörperchen) und aus 54% aus flüssigen Anteilen, dem Blutplasma (Synonym: Plasmavolumen / Blutflüssigkeit).

Die Blutzellen lassen sich in rote Blutkörperchen (Erythrozyten), weiße Blutkörperchen (Leukozyten) und die Blutplättchen (Thrombozyten) differenzieren.



Erythrozyten – rote Blutkörperchen – engl.: red blood cells

Sie zirkulieren im Blut und besitzen eine Lebensdauer von 100-120 Tagen. Ein wirksamer Reiz zum Anstieg der Erythrozyten ist u. a. das Absinken des O₂-Partialdrucks, wie es beim Höhentraining der Fall ist.

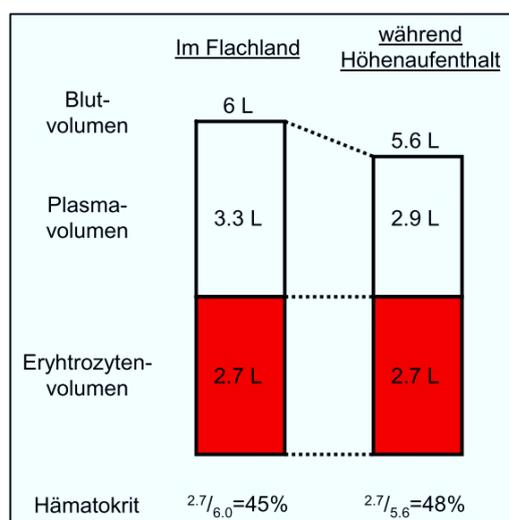
Menge bei Männern: ca. 5 Mio. pro mm³

bei Frauen: ca. 4 Mio. pro mm³

1l Blut: 5 Billionen Blutkörperchen

5l Blut: 25 Billionen Blutkörperchen

Abb. 4. Schematischer Aufbau des Blutes; (Rost, 2001)



Durch die enorme Anzahl der Erythrozyten wird ihre Aufgabe, der Sauerstofftransport im Blut, sehr gut deutlich (Rost, 2001). Wenn die Blutbildung z.B. durch einen Eisenmangel gestört ist, liegen die Erythrozyten meist unterhalb des Referenzbereichs.

Innerhalb der ersten 1 bis 2 Tage nach Erreichen einer bestimmten Höhenlage zeigt sich ein rascher Anstieg der Hämoglobinkonzentration, die auf die Abnahme des Plasmavolumens zurückzuführen ist (Schmidt, 2002).

Abb. 5. Effekte einer akuten Höhenexposition auf das Blutvolumen, Blutplasmavolumen, Erythrozytenvolumen und den Hämatokritwert (Villiger et al., 2005)

Hämatokrit (Def.): Der prozentuale Anteil der roten Blutzellen an der Gesamtblutmenge wird als Hämatokrit bezeichnet. Der Anteil der roten Blutkörperchen (Erythrozyten) ist darin bereits enthalten.

Normwerte: Männer: 43-49 % (auch: 40-52%); Frauen: 37-45 % (auch: 37-48%) – variiert leicht, je nach Quellenangabe; (Rost, 2001)

MERKE

Während eines Höheng Aufenthalts reduziert sich das Plasmavolumen innerhalb der ersten 24-48h um bis zu 500-1000ml. Ein Anstieg des Hämatokrits ist die logische Folge. Liegt der Hämatokrit oberhalb des Referenzbereiches, lässt dies auf ein herabgesetztes Fließvermögen (Viskosität) des Blutes schließen, welches mit einer höhenbedingten Mehrbelastung des Herzens einhergeht.

Hämoglobin: Der bedeutendste Bestandteil in den Erythrozyten ist der rote Blutfarbstoff Hämoglobin. Es besteht zu über 90% aus Protein und besitzt die Fähigkeit Sauerstoff in den Lungen anzunehmen und ihn im Gewebe wieder abzugeben. Das Hämoglobin stellt den größten organischen Puffer des Körpers dar und trägt dadurch zur Homöostase des Blut-pH-Wertes bei (Berghold et al., 2019; Thews, Mutscher, Vaupel, 2007)

MERKE

Der Anstieg des Hämatokrit- und Hämoglobinwertes in den ersten Tagen des Höheng Aufenthalts (Abb.5) hat nichts mit der gesteigerten Produktion an roten Blutkörperchen (Erythrozyten) in Folge eines Höhentrainings zu tun. Eine signifikante Zunahme der Masse an Erythrozyten ist frühestens nach 3 Wochen nachweisbar (Küpper et al., 2010).

Hämoglobinmasse (tHb-mass): Die in den Erythrozyten enthaltene gesamte Hämoglobinmasse stellt die absolute Menge an Sauerstofftransportträgern des Blutes dar. Bezogen auf das Körpergewicht weisen Ausdauertrainierte im Gegensatz zu Untrainierten eine um bis zu 36% höhere Hämoglobinmasse auf (Heinicke et al., 2001).

Erythropoese (Def.): Die Bildung von Erythrozyten im Knochenmark wird als Erythropoese bezeichnet. Störungen der Erythropoese können zu einer Anämie (Blutarmut) führen. Liegt z.B. ein Mangel an Eisen vor, kommt es zu einer verminderten Bildung von Hämoglobin und damit zu einer defizitären Erythropoese. Die damit verbundene Reduktion der Sauerstofftransportkapazität zeigt sich letztendlich in einer begrenzten oder verschlechterten Leistungsfähigkeit (Beard & Tobin, 2000).

Erythropoetin (EPO) Def.: Ist ein körpereigenes Hormon, welches die Entwicklung der roten Blutkörperchen (Erythrozyten) fördert und v.a. in der Niere produziert wird. Die Hypoxie ist ein starker Reiz für die Ausschüttung von körpereigenem EPO.

Der entscheidende Reiz um die Blutneubildung anzukurbeln ist der Abfall des Sauerstoffpartialdrucks. Nach 4-6 Tagen findet man im Blutbild eine Neubildung von jungen, noch unreifen roten Blutkörperchen (Retikulozyten). Hinzu kommt der Anstieg des EPO-Spiegels, der zwischen 48 und 72 Stunden sein Maximum erreicht. Dieser Anstieg hält jedoch nicht lange an und innerhalb der folgenden 5 bis 10 Tage kehren die Konzentrationen wieder zum Ausgangsniveau zurück, unabhängig davon ob die Menschen in der Höhenlage verbleiben oder nicht (Küpper et al., 2010; Heincke et al., 2003).

MERKE

Die Leistungsfähigkeit eines Ausdauersportlers wird in hohem Ausmaß von seiner totalen tHb-mass bestimmt. Die Erhöhung dieses Parameters um 1 g geht mit einer Erhöhung der VO_{2max} um rund 3 ml/min einher. Wenn Anstiege der tHb-mass ermittelt werden, liegen diese zumeist in Bereichen von 20-40g, zwischen denen ein Zeitraum von ca. 4 Monaten liegt (Schmidt & Prommer, 2008).

MERKE

Werden Veränderungen in der Hämoglobinmasse und im Erythrozytenvolumen (EV) angestrebt, so ist die „Höhendosis“ entscheidend. Ein Aufenthalt ab >400 h und Training in mittleren Höhen kann zu einer temporären Hämoglobinmassenzunahme von 4–7% beitragen (Wehrlin et al., 2016). In einer früheren Studie von Wehrlin et al. (2006b) wurden Anstiege von ca. 5% in der tHb-mass im EV bei 24 Tagen Aufenthalt auf 2456m, mit Trainingshöhen zwischen 1800m und 1000m gemessen.

MERKE

Für eine vollständige Darstellung dieses Sachverhalts muss darauf hingewiesen werden, dass es eine Reihe von Studien gibt, in denen sich die hämatologischen Variablen nach Höhenttraining nicht verbessert haben. Im Review von Ploszczyca et al. (2018) werden mehrere Studien aufgeführt, in denen die tHb-Masse und das EV nach dem LH-TH- oder LH-TL-Protokoll nicht zunahmten (Ploszczyca et al., 2018).

Die im Übersichtsartikel von Wehrlin (2005) dargestellte Grafik unterstreicht noch einmal den, in verschiedenen Studien gefundenen Zusammenhang, zwischen Aufenthaltsdauer und dem Einfluss auf die Blutparameter.

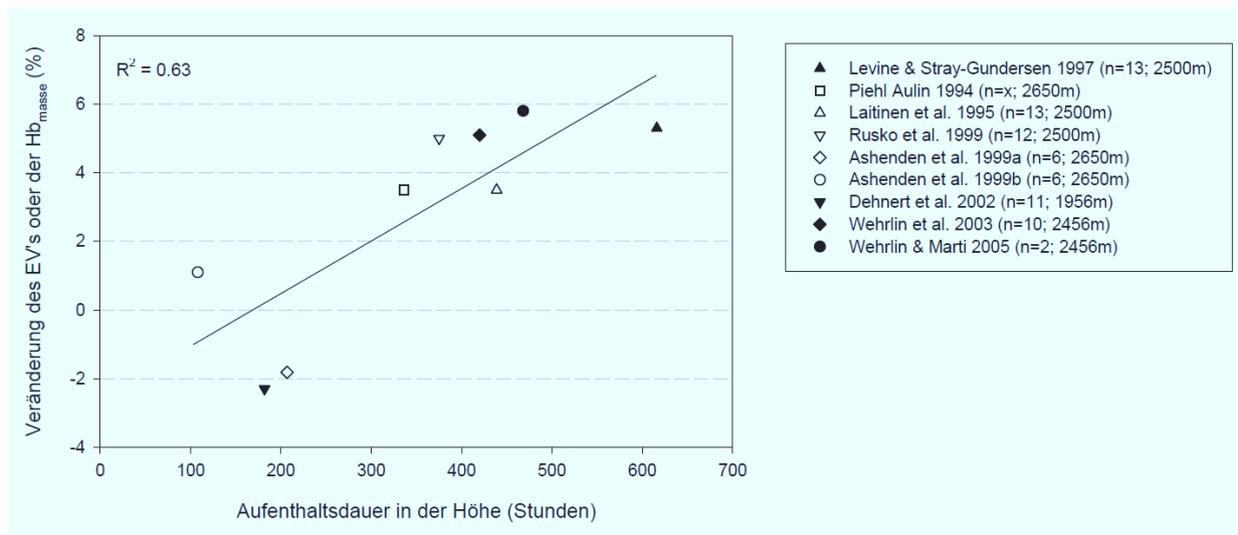


Abb. 6. Veränderung des Erythrozytenvolumens (EV) oder der Hämoglobinmasse (Hbmasse) in Relation zur Aufenthaltsdauer und Aufenthaltshöhe bei Studien mit Ausdauerathleten, welche nach dem Höhentrainingskonzept „Live high – train low“ durchgeführt wurden. Angegeben sind zudem die Regressionslinie sowie die Erklärungsvarianz (Grafik modifiziert nach Rusko et al., 2004) (entnommen aus: Wehrli, 2005)

1.4 Zusammenhang zwischen Blutvolumen und Flüssigkeitshaushalt

Bei einem Aufenthalt in mittleren Höhen entwickelt sich bereits in den ersten 2- 4 Tagen ein „inverser“ Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Hämoglobinkonzentration, ausgelöst durch eine Reduktion der Plasmaflüssigkeit. Dieser Vorgang kann als „Eindickung des Blutes“ aufgrund von Flüssigkeitsverlust beschrieben werden. Er spiegelt sich in einem geringeren Blutvolumen wieder, wodurch es zu einem Anstieg des Hämatokrit-Wertes kommt (Küpper et al., 2010). Der Flüssigkeitsverlust entsteht durch die gesteigerte Atmung und die erhöhte Urinausscheidung. Dies sollte mit ausreichenden Trinkmengen ausgeglichen werden.

PRAXISTIPP

Um den Hydrationsstatus zu überprüfen, ist es ratsam, regelmäßig das Körpergewicht und die Urinfarbe zu kontrollieren (Wehrli, 2005).

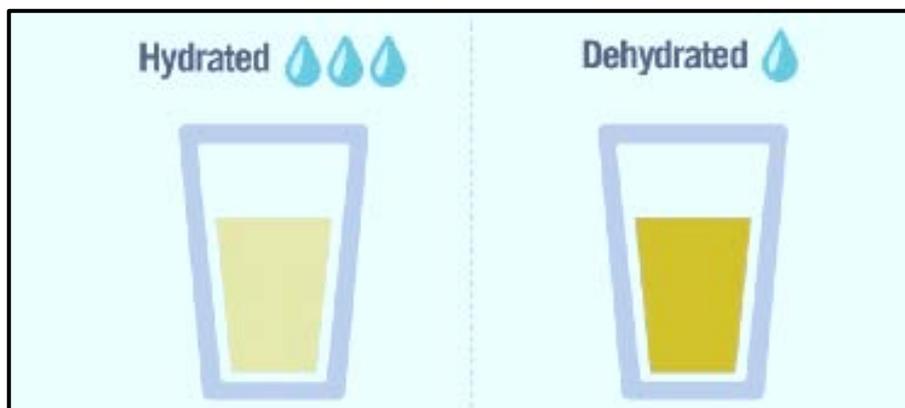


Abb. 7. Die Urinfarbe als Anhaltspunkt zum Hydrationsstatus © PowerBar

PRAXISTIPP

Als Faustregel gilt; mindestens 1 Liter pro 1000 m zusätzlicher Höhe aufnehmen. Koffeinhaltige oder andere harntreibende Getränke sorgen für weiteren Flüssigkeitsverlust (Wehrlin, 2005).

1.5 *Auswirkungen auf die Muskulatur*

Die gegenwärtigen Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Hypoxie auf die Muskulatur müssen differenziert betrachtet werden. Eine Reihe von Anpassungen in der Skelettmuskulatur sind in Höhen über 3000m oder bei Expeditionen in extremen Höhen dokumentiert worden. Darunter fallen eine erhöhte Kapillarisation und mitochondriale Kapazität, eine verringerte Laktatproduktion oder eine erhöhte Geschwindigkeit des Laktatabbaus (lactate clearance), verbesserte Pufferkapazität und Veränderungen in der Substratverwertung, speziell auf Kohlenhydratebene. Diese Effekte können zwar zum Verständnis der Mechanismen der Akklimatisierung beitragen, sollten aber nur begrenzt zur Erklärung von potentiellen Leistungsveränderungen bei Sportlern herangezogen werden.

Um hingegen muskuläre Auswirkungen eines Trainings in mittleren Höhen zu beschreiben, sollten die Arbeiten von Prof. Hoppler und Kollegen von der Universität Bern herangezogen werden. Die Forschungsgruppe konnte zeigen, dass je nach Höhentrainingsform positive Veränderungen in der Sauerstofftransportkapazität bzw. in der muskulären Sauerstoffverwertung möglich sind (Vogt & Hoppler, 2005).

Die daraus folgende Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit basiert auf der Fähigkeit der Muskeln den vorhandenen Sauerstoff optimal zu nutzen sowie auf einer Veränderung von Struktur und Form der belasteten Muskulatur. Im Speziellen wird in diesem Zusammenhang eine gesteigerte Kapillarisation, ein erhöhter Myoglobingehalt, eine gesteigerte Enzymaktivität oder eine größere Anzahl an Mitochondrien beschrieben (Gore et al., 2007; Vargas-Pinilla, 2014).

Diese Effekte konnten vorrangig durch einen intermittierenden Hypoxiereiz erzielt werden, in dem lediglich das Training unter Hypoxie durchgeführt wurde (vgl. Kap. 3 - IHT: intermittierendes hypoxisches Training).

Dagegen waren die Erkenntnisse aus verschiedenen Studien der 90er Jahre eher widersprüchlich. Einerseits wurde eine signifikante Zunahme der Muskelpufferkapazität bei Elite-Skilangläufern und Läufern nach einem zweiwöchigen Aufenthalt und Training in Höhen zwischen 2.000 und 2.700 m festgestellt. Im Gegensatz dazu beobachteten Stray-Gundersen et al. (1999) jedoch keine Erhöhung der Muskelpufferkapazität (Vargas-Pinilla, 2014).

In einer Arbeit von Friedmann (2000) wird außerdem resümiert, dass die zu erwartenden Akklimatisationsreaktionen der Muskulatur denen entsprechen, die auch bei einem regelmäßigen Ausdauertraining beobachtet werden. Im Hinblick auf eine mögliche Änderung der

Muskelfaserverteilung durch Höhenttraining, sind keine Veränderungen zu erwarten (Friedmann, 2000).

MERKE

Aufenthalte in geringen bis mittleren Höhen, mit Zeiträumen von 2-3 Wochen haben kaum negative Auswirkungen auf die Muskulatur. Der oftmals propagierte Abbau von Muskulatur wurde ab Höhen über 3500m bzw. 4000m beobachtet und auch nur wenn der Aufenthalt entsprechend mehr als 4 Wochen andauert.

1.6 Zum Phänomen der Responder / Non-Responder

Wenn Aussagen zur Wirksamkeit eines jeweiligen Höhenttrainings getroffen werden sollen, muss immer von einer starken Variation ausgegangen werden.

Chapman et al. haben 1998 in diesem Zusammenhang die Begriffe der Responder und Non-Responder geprägt, (*engl: non = „nicht“ und to respond = „antworten“, „reagieren“, deutsch „Nichtreagierer“*) In deren Untersuchung wurden signifikant erhöhte EPO-Levels, gesteigerte Erythrozytenzahlen und erhöhte VO_{2max} Werte bei den so genannten Respondern festgestellt. Ein weiterer Grund für die bessere „response“ wird von Chapman et al. (1998) in der besseren Trainingsqualität der Responder in der Höhe gesehen, welche dort höhere Laufgeschwindigkeiten im Rahmen ihrer Studie absolvieren konnten. (Chapman et al., 1998) Somit scheint das Leistungsniveau der Athleten, welche für ein Höhenttraining in Frage kommen, ebenso von Bedeutung zu sein.

In den letzten Jahren wurden die Begriffe Responder und Non-Responder hinsichtlich ihrer Verwendung immer wieder als ungeeignet eingeschätzt. Wenn vom Non-Responder gesprochen wird, impliziert dies eine allgemein gültige Eigenschaft, die nicht durch die gewählte Trainingsform beeinflusst werden kann. Die Formulierung „Low-Responder“ wird in dem Zusammenhang als treffender erachtet (Kura, 2021).

Wenn eine positive Leistungsentwicklung als Kriterium im Nachgang eines Höhenttrainings herangezogen wird, muss festgehalten werden, das je nach Sportler individuell unterschiedliche Zeiträume zur Ausprägung einer positiven Leistungsfähigkeit zu erwarten sind (Friedmann-Bette, 2008).

MERKE

Bei der Beantwortung der Frage, ob jemand ein Responder oder ein Non-Responder ist, fällt die EPO-Antwort des Organismus offenbar individuell sehr unterschiedlich aus. Der im Körper auflaufende Mechanismus, mit der Vorstufe der Neubildung von Retikulozyten und der daraus resultierenden Erhöhung des Erythrozytenvolumens, darf aus diesem Grunde nicht pauschalisiert werden.

MERKE

Die Aussage bzw. die Trainereinschätzung ob sein Sportler ein Responder oder Non-Responder ist, muss per Definition auf Basis von hämodynamischen Reaktionen betrachtet werden. Oftmals wird dieser Begriff jedoch in einem anderen Kontext benutzt und sofort mit der Aussage einer positiven oder negativen Leistungsentwicklung nach dem Höhentraining in Zusammenhang verwendet.

1.7 Zusammenfassung – Physiologie Fakten

Eine Trennung von akuten physiologischen und chronischen Anpassungen, die durch Höhengaufenthalte ausgelöst werden, sind wesentliche Unterscheidungen für das Verständnis.

Als Akutreaktion versucht der Körper den Sauerstoffmangel zu kompensieren und leitet verschiedene Reaktionen ein. Durch die Hypoxie wird im Atemzentrum der Reiz zur Erhöhung des Atemminutenvolumens ausgelöst, was sich durch eine mehr oder weniger starke Hyperventilation bemerkbar macht. Zusätzlich werden die Atemwege weitgestellt und das Herzminutenvolumen steigt.

Mit zunehmender Höhenexposition nimmt die maximale Sauerstoffaufnahme kontinuierlich ab und sinkt bei Spitzensportlern linear um etwa 6-8 % pro 1000 m zunehmender Höhe, ausgehend von 0m Meereshöhe bis 3000 m. (vgl. Abb. 2) Diese Abnahme ist individuell unterschiedlich und hängt vom Geschlecht, der Hämoglobinmasse, der Muskelmasse und vom Trainingsniveau ab.

Für ein detailliertes Verständnis dieser Mechanismen, sollten die Arbeiten Wehrlin & Hallen herangezogen werden. Die Schweizer Arbeitsgruppe konnte zeigen, dass die Beeinträchtigung der aeroben Leistung bei zunehmender Höhen (~1 % pro 100 m über 1500 m) hauptsächlich auf den Abfall des O₂-Partialdrucks und auf den damit verbundenen Abfall der arteriellen O₂-Sättigung zurückzuführen ist (Girard et al., 2017; Wehrlin & Hallen, 2006).

Mit Hilfe der Sauerstoffsättigung (SaO₂) kann überprüft werden, zu wieviel Prozent das vorhandene Hämoglobin aktuell mit Sauerstoff gesättigt ist. Diese Sättigung hängt vom vorherrschenden Sauerstoffpartialdruck in der jeweiligen Höhenlage ab (Oczenski, 2008).

Weiterhin reagiert das Herz- Kreislauf- System mit einer Zunahme der Ruhe- wie auch der Belastungs-Herzfrequenz in den ersten Tagen wodurch der erhöhte Sauerstoffbedarf abgesichert wird.

Die verringerte Verfügbarkeit von Sauerstoff, beginnend mit der Aufnahme aus der Atmosphäre und hat Einfluss auf verschiedene Körpersysteme (vgl. Abb.8). Die arbeitende Skelettmuskulatur des Sportlers ist der letzte Teil einer Kaskade, in der die verschiedenen Körpersysteme beteiligt sind. Der vorherrschende Sauerstoffmangel beeinflusst die Funktionsfähigkeit der einzelnen Glieder der Kaskade und hat somit für Training und Wettkämpfe in den relevanten Höhenlagen zwischen 1500 - 3000m eine große Bedeutung. Insbesondere

bei anaeroben Belastungen wirkt dieser Effekt auf die Funktionsfähigkeit zu einer reduzierten körperlichen Leistungsfähigkeit.

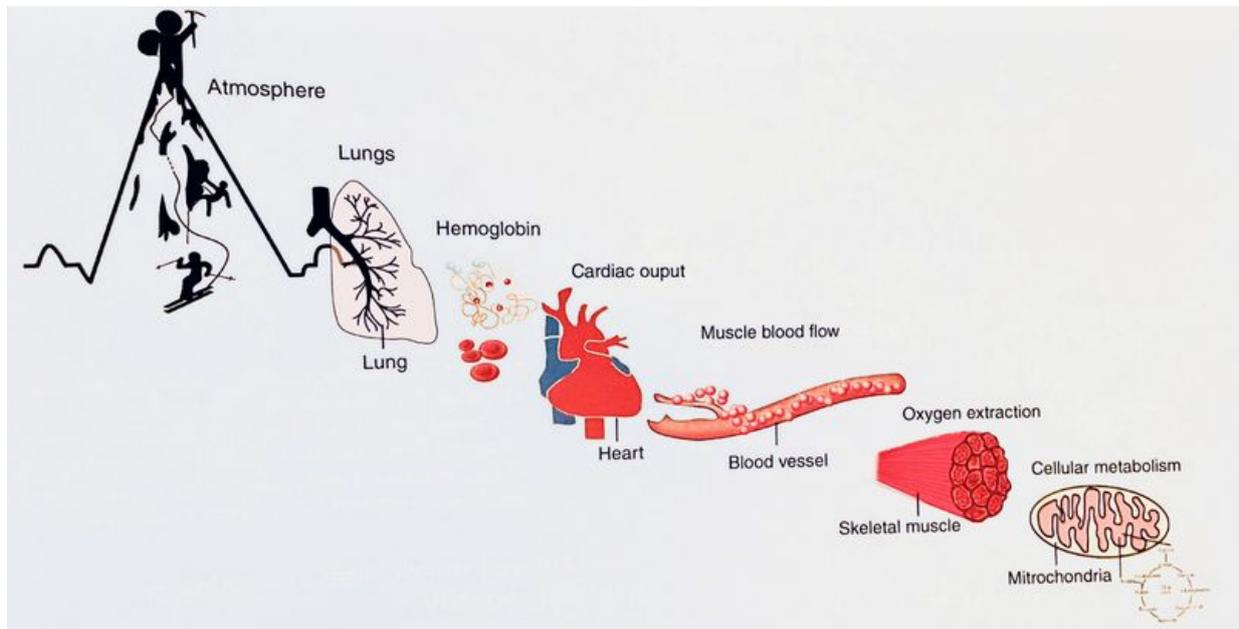


Abb. 8: Die Sauerstofftransport- Kaskade von der Atmosphäre zu den Mitochondrien im Skelettmuskel, (Ward et al., 2021)

Die beiden Schlüsselfaktoren für den Sauerstofftransport im Blut, sind die totale Hämoglobinmasse und das Blutvolumen. (Pommer et al., 2010) Ein erhöhtes Volumen der roten Blutkörperchen ist u.a. für die Ausprägung der VO_{2max} auf Meereshöhe ausschlaggebend (Lundby et al., 2017).

Inwiefern aus einer gesteigerten Hämoglobinmasse eine verbesserte Leistungsfähigkeit hervor geht, kann nicht zweifelsfrei gesagt werden. Theoretisch sollte es so sein, dass sich durch eine erhöhte Hämoglobinmasse die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) erhöht, woraus eine verbesserte aerobe Ausdauer resultiert.

Prof. W. Schmidt von der Universität Bayreuth konnte in seinen Studien zum Einfluss von Höhentrainingslagern auf die Hämoglobinmasse zeigen, dass auch noch 3 Wochen nach Beendigung des Trainingslagers, 50 % des Höheneffekts erhalten werden konnten. Diese Erkenntnis könnten für die Planung des zeitlichen Abstandes zwischen Trainingslager und Wettkampf äußerst hilfreich sein.

Aussagen bzw. Interpretationen zu Hämoglobin- und Hämatokrit-Werten, die unmittelbar vor oder nach HT getätigt werden, haben kaum eine sportmedizinische Relevanz, da es sich hierbei um relative Werte handelt die v. a. in Verbindung mit Schwankungen im Plasmavolumen stehen. Um gesicherte Angaben zu möglichen Effekten auf die Blutneubildung nach HT geben zu können, ist immer ein Differenzialblutbild sowie eine Bestimmung der totalen Hämoglobinmasse notwendig.

Bei Sportlern, die noch wenig Höhentrainingerfahrung haben, empfiehlt sich die Messung, als auch ein Monitoring der Sauerstoffsättigung (mittels Pulsoxymetrie), um den Hypoxiegrad festzustellen. Je länger man in der Höhe ist, desto weniger sollte die SaO₂ während einer standardisierten Belastung abfallen. Diese Messung kann auch für die Schulung der Selbsteinschätzung verwendet werden (Villiger et al., 2005).

Außergewöhnliche physiologische Besonderheiten weisen Hochlandbewohner aus den Anden, Kenia oder der Himalaja Region auf. Bei ihnen liegen chronische Anpassungen wie auch genetische Unterschiede in ihrer gesamten Leistungsphysiologie vor. Deren „bessere“ Leistungsfähigkeit scheint nicht vorrangig der Höhenwirkung des Trainings geschuldet, sondern den Langzeiteffekten wie z.B. eine enorm hohe arterielle O₂-Sättigung trotz Höhen bis 4000m oder die erhöhten Hämoglobinmassen bzw. -Konzentrationen. Intensives Training seit der Kindheit und günstige biomechanische Faktoren (Körpermasse, Länge der Beine) bieten zusätzliche Vorteile (Böning, 2019).

2 Anpassungen und Training in der Höhe

Grundsätzlich wird der Akklimatisationsprozess in akute sowie chronische Reaktionen unterschieden. In der deutschsprachigen Literatur wird für gewisse Sofortreaktionen wie z.B. der Anstieg von Atem- oder Ruheherzfrequenz, der Begriff „Adaptation“ oder „Höhenadaptation“ verwendet. In der englischsprachigen Literatur wird Adaptation nur in Verbindung mit jahrelanger Höhenexposition verwendet. (Tomastis & Haber, 2016; Wonisch et al. 2017, Luks et al., 2021).

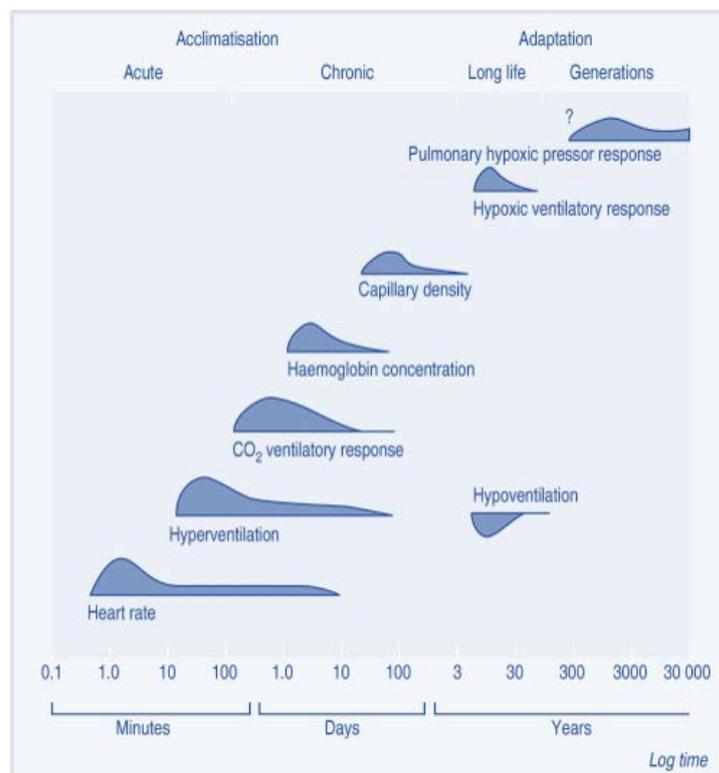


Abb. 9. Zeitverlauf und Intensität einzelner Akklimatisationsvorgänge (Heart rate - Herzfrequenz, Hyper- und Hypoventilation, CO₂VR - carbon dioxide ventilatory response – ventilatorische Kohlendioxid-Reaktion, Hb- Hämoglobinkonzentration, Cap. Dens.- Veränderung der Kapillardichte bzw. Kapillarisation, HVR - hypoxic ventilatory response - ventilatorische Hypoxieantwort, PHPR - pulmonary hypoxic pressor response (Luks et al., 2021)

In der Abb. 9 wird die akute und chronische Akklimation sowie die lebenslangen und generationsübergreifenden Adaptationen auf einer entsprechenden Zeitachse dargestellt. Die in den Bereichen „Long life“ und „Generations“ dargestellten Vorgänge sind hauptsächlich für Hochlandbewohner relevant. Für Skilangläufer bzw. für die Zielgruppe dieses Artikels sind sie weniger von Bedeutung und wurden nur der Vollständigkeit halber aufgeführt. Daraus folgend sind für einen Leistungssportler zwei wesentliche Haupteffekte von Bedeutung. Einerseits kann ein systematisches Training unter Hypoxie als zusätzlicher Trainingsreiz genutzt werden, wodurch die Leistungsfähigkeit (in den meisten Fällen) günstig beeinflusst wird. Der vom erniedrigten PO_2 ausgelöste Sauerstoffmangel, bildet die Rahmenbedingungen für die Anwendung einer Höhentrainingsform.

Andererseits führt bereits ein Höhengenaufenthalt ab 1500m ü.M. zu einer zu einer Anregung (im besten Fall zu einer Steigerung) der Blutneubildung (Erythropoese), woraus letztlich eine Verbesserung des Sauerstofftransports resultiert. In Bezug auf die Trainingsinhalte sollte vorerst das extensive aerobe Training mit allgemeinen, semispezifischen und spezifischen Mitteln gewählt werden bis der Akklimationszeitraum abgeschlossen ist (vgl. Kap. 3). Diese Phase der Akklimation schwankt von Athlet zu Athlet. Sie wird in der neueren wie auch älteren Literatur mit 10-14 Tagen angegeben (Sandbakk et al., 2021) und wird im Folgenden anhand von 3 Beispielen dargestellt.

Um valide Angaben zum Akklimationszustand eines Athleten geben zu können, wird üblicherweise die aerobe Leistungsfähigkeit herangezogen die auf Basis der Sauerstoffaufnahme bewertet wird.

Eine der wichtigsten Größen in diesem Zusammenhang, ist die VO_{2max} , die zwar keine Leistung im engeren Sinne darstellt (Leistung pro Zeit), von der die Leistung im Ausdauersport aber eindeutig abhängt (Wehrlin et al., 2016). Ein Absinken der aeroben Leistung in verschiedenen Höhenlagen ist somit gleichbedeutend mit einer Reduktion der VO_{2max} ausgehend von der Seehöhe 0m ü.M. (vgl. Abb. 10) Wird die aerobe Leistung (in %) zwischen nicht-akklimatisierten und akklimatisierten Sportlern als Bewertungskriterium herangezogen, stellten Basset et al. (1999) deutliche prozentuale Unterschiede in der Gruppe der nicht-akklimatisierten Sportler fest. Hinter der Kategorisierung verbirgt sich der Vergleich zwischen 1-7 Tagen versus mehrere Wochen Höhenttraining. Leider wurde dabei nicht spezifiziert, wie viel „mehrere Wochen“ beinhalten (Basset et al., 1999).

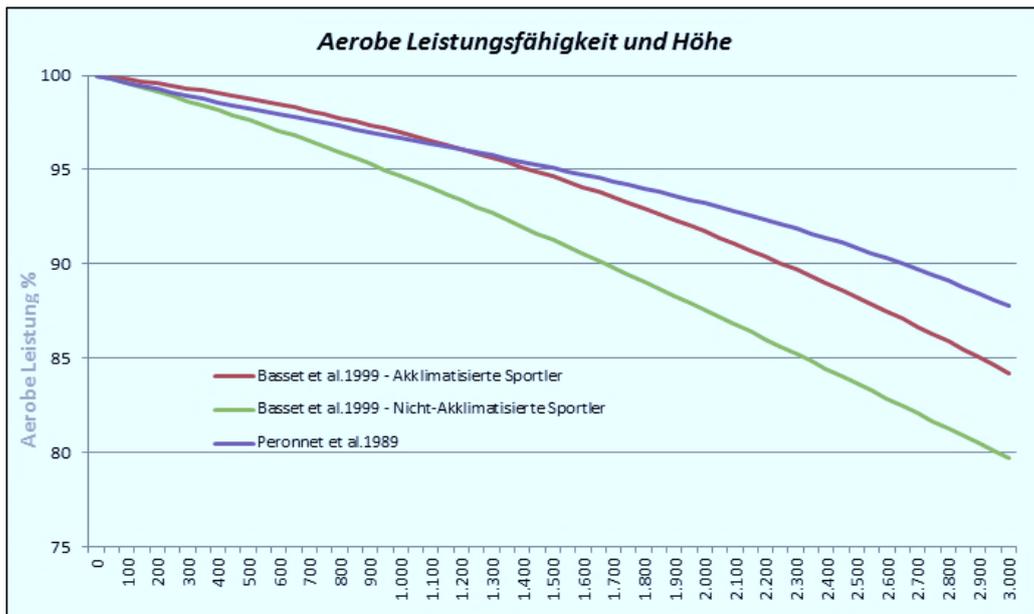


Abb. 10. Darstellung der aeroben Leistung (in %) von akklimatisierten und nicht-akklimatisierten Sportlern in Abhängigkeit der Höhenlage, (modifizierte Darstellung, nach Basset et al., 1999)

Bei einer Akklimations-Studie von Schuler et al. (2007) wurde ein Monitoring von $\dot{V}O_{2max}$, Maximalleistung, EPO-Konzentration, Hämatokrit u.a. Parametern an Elite-Radrennfahrern auf 2340m durchgeführt. So war z.B. am 1.Tag des Höhengaufenthalts ein Abfall der $\dot{V}O_{2max}$ von 12,8% zu verzeichnen, der in den Folgetagen wieder Stück für Stück rückläufig war (Tag 1 bis Tag 7 um 3%; Tag 7 bis 15 um ca. 5%). Ähnliche Verläufe einer anfänglich reduzierten $\dot{V}O_{2max}$ mit stückweise einsetzenden Anstiegen, während des Höhentrainings, werden ebenso bei Rusko (2003) beschrieben (vgl. Abb. 11).

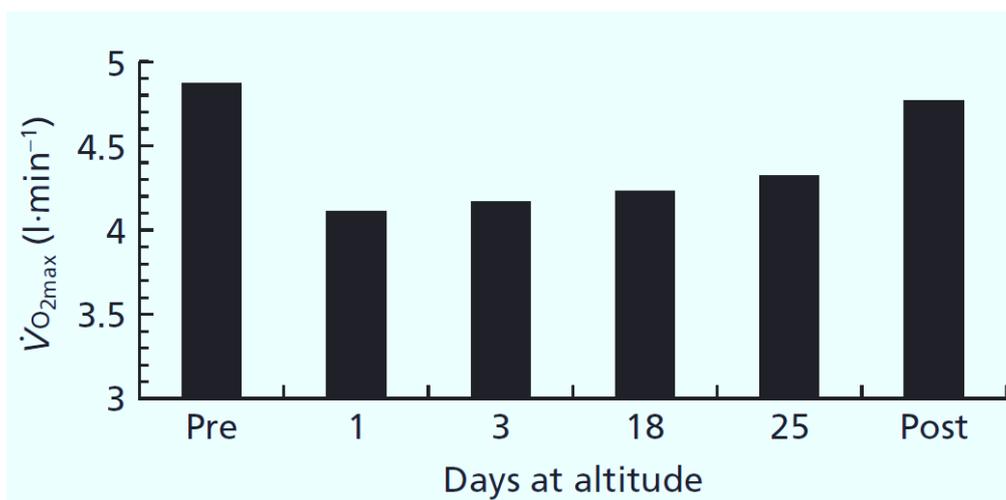


Abb. 11. Verhalten der $\dot{V}O_{2max}$ bei Skilangläufern während eines Höhentrainings auf etwa 2200 m zu definierten Zeitpunkten im Vergleich zu „pre“ = vor Höhentrainings und „post“ = nach

Das Verhalten der Laktatkonzentrationen während der Akklimation in geringen bis mittleren Höhen wird idealerweise intensitätsabhängig / belastungsabhängig betrachtet und mit Hilfe von Verlaufskurven dargestellt. Abbildung 12 zeigt die Herzfrequenz (links) und das Blutlaktat (rechts) von Skilangläufern während einer konstanten, submaximalen Laufbandbelastung bei vier verschiedenen Intensitäten bzw. Steigungswinkeln. Herzfrequenz und Laktat stiegen zu Beginn des Höhentrainingslagers deutlich an. Nach unterschiedlich stark ausgeprägten Reaktionen in den ersten Tagen, näherten sich die Werte nach etwa 10-15 Tagen wieder denen, des Ausgangsniveaus.

PRAXISTIPP

Zu Beginn des Höhentrainings liegen die Trainingsherzfrequenzen meist höher als jene, aus den vergleichbaren Intensitäten des Flachlandes. Als grobe Orientierung gibt Rusko (2003) an, die Trainingsherzfrequenzen zu Beginn ca. 5-10 Schläge pro Minute niedriger als auf Meereshöhe anzusetzen, um eine zu hohe anaerobe Energieproduktion zu vermeiden.

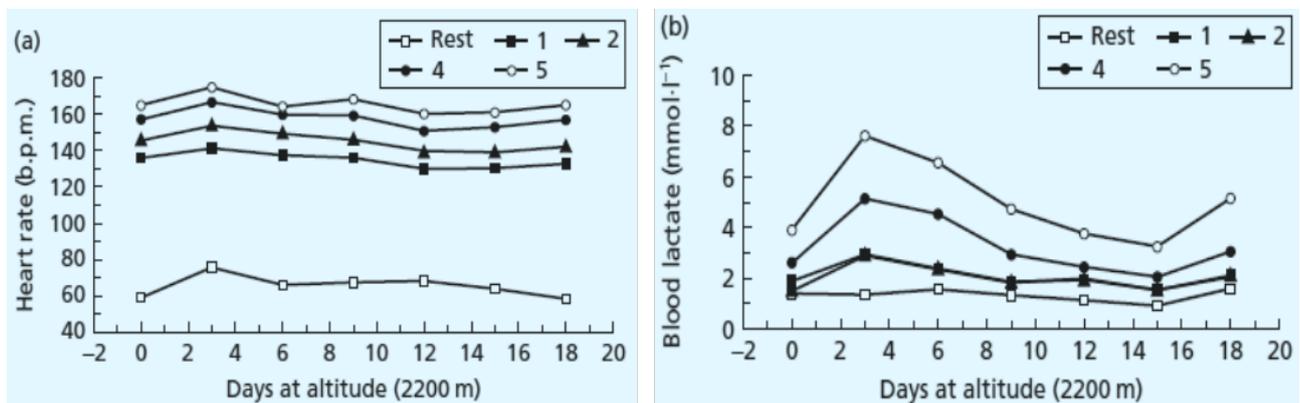


Abb. 12. Verlauf von Herzfrequenz (links) und Laktatkonzentration (rechts) von Skilangläufern, bei Laufbandbelastungen während eines Höhentrainings, Rest = Ruhewert, 1,2,4 und 5 bezieht sich auf verschiedene Laufbandsteigungen von 1°, 2°, 4° und 5° während 4x4-minütigen Belastungsstufen (Rusko, 2003)

Die beispielhaft dargestellten Ergebnisse zu den verschiedenen Anpassungsreaktionen von Basset et al. (1999), Schuler et al. (2007) und Rusko (2003) zeigen, dass Athleten die Wettkämpfe in geringen bis mittleren Höhen planen, empfohlen wird, sich dieser Höhe mindestens 14 Tage vor dem Wettkampf auszusetzen.

Diese Angaben zu den Zeitverläufen der Akklimation stehen in Einklang zu aktuellen praxisorientierten Review's von Butcher et al. (2018) oder Mujika et al. (2019), bei denen übereinstimmend Zeiträume von mindestens zwei Wochen, auch für Wettkämpfe in moderater Höhe, empfohlen werden (Butcher et al., 2018; Mujika et al., 2019).

2.1 Konzepte im Höhenttraining

Basierend auf dem Review von Millet et al. 2010 und Wilber et al. 2011, versteht man unter Höhenttraining den permanenten Aufenthalt plus das Training in Höhen zwischen 1800m und 2500m (bis 3000m) mit einer Dauer von 2-3 Wochen. Damit die Maßnahme als „echtes“ Höhenttraining bezeichnet werden kann und um relevante hämodynamische Anpassungen / Effekte zu erzielen, sollten Rahmenbedingungen von mind. 400 Stunden oder ein Zeitfenster von 18-21 Tagen erfüllt werden (Küpper et al. 2010; Wehrlin et al., 2016).

Die nachfolgend aufgeführten Konzepte sollen in dieser Arbeit als Konzepte der natürlichen Hypoxie verstanden werden.

Die drei etablierten Konzepte sind dabei folgende:

- 1) **Live high – train high (LH-TH)**
- 2) **Live high – train low (LH-TL)**
- 3) **Live low – train high (LL-TH)**

Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren kombinierte Methoden von Hypoxie und Normoxie im Hochleistungssport entwickelt und etabliert. In diesem Zusammenhang hat die „Intermittierende Hypoxie“ stark an Bedeutung gewonnen, auf die im weiteren Verlauf dieses Abschnitts gesondert eingegangen wird. Innerhalb dieser Subkategorie von LL-TH muss zwischen einer passiven und einer aktiven Hypoxie-Exposition unterschieden werden, was in der Abb. 13 dargestellt wird.

Auf die Methoden der künstlichen Hypoxie (normobare Hypoxie), bei der durch medizinische Geräte höhenbedingte Druckänderungen oder Sauerstoffmangel hervorgerufen werden, wie auch der unterschiedliche Einsatz von Gasgemischen zur Inhalation, wird im Folgenden nicht eingegangen.

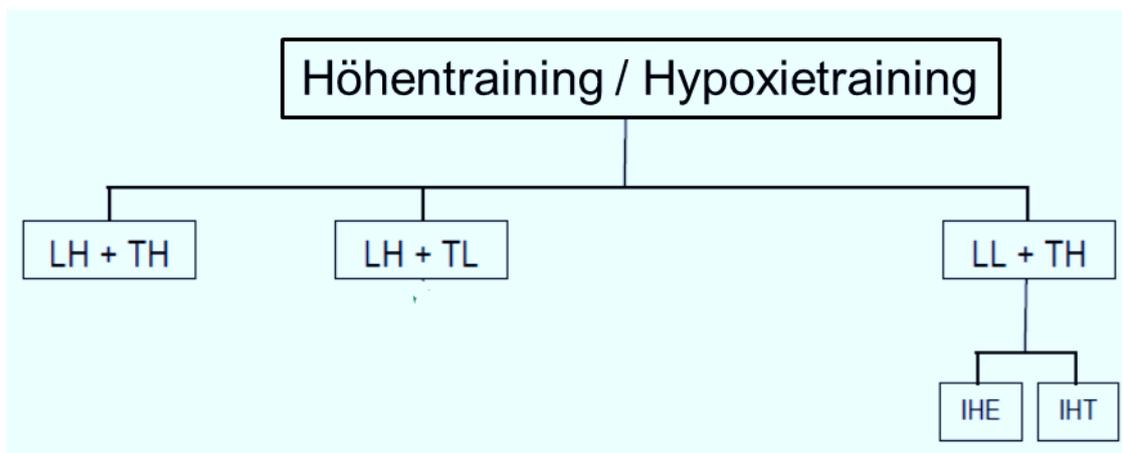


Abb. 13. Klassische Höhenttrainingskonzepte im **natürlichen** Höhenttraining / Hypoxietraining; LH + TH (live high + train high), LH + TL (live high + train low), LL + TH (live low + train high), IHE (intermittent hypoxic exposure - intermittierende hypoxische Exposition), IHT (intermittent hypoxic training- intermittierendes hypoxisches Training), (modifizierte Grafik nach Wilber, 2011)

Live high – train high (LH-TH) “Klassisches Höhentraining”

Das LH-TH Konzept ist die bekannteste und traditionellste Methode im Höhentraining. Sie wird, in der ursprünglichen als auch in der heutigen Form, in natürlicher Höhe durchgeführt. Die Athleten leben und trainieren unter Hypoxiebedingungen zwischen 1800m und 2500m. Insofern der geplante Wettkampf / Saisonhöhepunkt in einer mittleren Höhenlage stattfindet, gilt dieses Konzept als sehr wirkungsvoll (Rusko, Tikkanen, Peltonen, 2004; Wilber, 2004). Je niedriger die Höhe, aus der angereist wird, desto länger sollte die Akklimatisationszeit (in Tagen) sein.

Live high – train low (LH-TL)

Die leistungsfördernde Wirkung eines kombinierten Höhen- und Flachlandtrainings “live high–train low” (LH-TL) wurde von Levine & Stray-Gundersen erstmals 1997 wissenschaftlich belegt und publiziert. Die Methode zielt darauf ab, die Leistung des Athleten konsequenter zu verbessern als das klassische "live high-train high"- Modell (Robach, 2006). Die Sportler versuchen die positiven Effekte wie z.B. den Anstieg rote Blutkörperchen und der Hämoglobinmasse im „live high“ zu nutzen und die Nachteile des „train high“ zu reduzieren (absolute Trainingsintensität ↓). Hervorzuheben ist, dass LH-TL nicht bedeutet, im Flachland zu trainieren. Vielmehr geht es darum, die jeweilige Höhe, auf der der Wettkampf stattfindet, vorzubereiten. Somit kann „train low“ auch bedeuten, auf 1800m zu trainieren, wenn der vorzubereitende Wettkampf auf dieser Höhe stattfindet (Villiger et al., 2005).

Kombinationsformen LH-TL & High oder LH-TH & Low

Eine erweiterte Form des LH-TL, bei welcher niedrig intensive Einheiten nach einer gewissen Akklimatisation ebenso in großer Höhe und die intensiven Einheiten weiter unten stattfinden können, wäre ebenso denkbar und wird als „live high –train high and low“ (LH-TH-Lo) bezeichnet. Hervorzuheben ist hierbei, dass gewisse Belastungsintensitäten und die damit verbundenen schnellen Bewegungsmuster/-geschwindigkeiten in den niedrigeren Höhen besser realisiert werden können, welche im „train-high“ möglicherweise limitiert sind. Außerdem gibt es eindeutige Beweise darauf, dass intensives Training in geringen bis mittleren Höhe muskuläre Anpassungen, sowohl in Richtung aerobe als auch anaerobe Arbeitsweisen, stimuliert und der Leistungsabfall begrenzt wird (Millet et al., 2010).

Gleichzeitig können die Effekte des „live-high“ unter Berücksichtigung adäquater regenerativer Maßnahmen (Pausengestaltung zwischen den Trainingseinheiten) und eines adäquaten trainingsmethodischen Vorgehens (reduzierter Umfang und Intensität) genutzt werden. Dieses Fazit geht aus dem Übersichtsartikel zu „Live High-Train Low“ von Wehrlin (2005), wie auch aus der Analyse von Rodriguez & Ávila (2018) hervor.

MERKE

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass ein Großteil der LH-TL- Studien auf eine Verbesserung der „sea level performance“ abzielt, was im Hinblick auf die Wettkampfort der Skilanglaufwettbewerbe bei den Olympischen Winterspiele 2022 nicht gegeben ist.

Live low- train high (LL-TH)

Aus logistischen und kostentechnischen Gründen entwickelt sich der Ansatz LL-TH zu einer wichtigen Intervention im modernen Sport. Es wird entweder unter natürlichen oder künstlichen Höhenbedingungen trainiert, während man in der trainingsfreien Zeit in Normalhöhe weilt (Vogt, Flück, Hoppeler, 2004).

Athleten, die LL-TH-Methoden anwenden, werden in diskreten und relativ kurzen Intervallen einer Exposition von Hypoxie ausgesetzt, die in der Regel <2 Stunden dauert, entweder in Ruhe oder während des Trainings, 2-5 Mal pro Woche (Girard et al., 2020).

Mögliche Verbesserungen der körperlichen Leistungsfähigkeit, die sich aus LL-TH- Interventionen ergeben können, hängen von der Art und Intensität des Trainings ab. Dazu gehören eine Reihe unterschiedlicher Varianten die entweder lokale Hypoxie durch die „blood flow restriction“- Methode (kurzzeitige Blutfluss-Einschränkungen durch Druckmanschetten an den Extremitäten) und / oder systemische Hypoxie wie z.B. kontinuierliches Training mit niedriger Intensität, hypoxisches Intervalltraining (IHT), wiederholtes Sprinttraining in Hypoxie (RSH), Sprint-Intervalltraining in Hypoxie (SIH) und Krafttraining in Hypoxie (RTH) anwenden (Girard et al., 2020).

Intermittierende Hypoxie (IHE oder IHT) Form der Modifikation von LL –TH

Mit Hilfe einer Differenzierung innerhalb des LL-TH kann der zeitweilige Einsatz der Hypoxie noch genauer beschrieben werden. Mit Hilfe der Begriffe IHE und IHT wird unterschieden, ob die Hypoxie in Ruhe oder in Verbindung mit einer körperlichen Aktivität durchgeführt wird. Intermittierende hypoxische Exposition (IHE) oder periodischer Einsatz von Hypoxie ist definiert als eine Hypoxieform von Sekunden bis Stunden, die über mehrere Tage bis Wochen wiederholt wird. Diese intermittierenden Phasen der Hypoxie werden durch eine Rückkehr zur Normoxie oder zu niedrigeren Hypoxiestufen unterbrochen (Wilber, 2011).

Bärtsch und Kollegen (2008) konnten zeigen, dass allein durch IHE keinerlei physiologische Anpassungsreaktionen hervorgerufen werden, die im Zusammenhang mit einer möglichen Steigerung der Leistungsfähigkeit stehen (Bärtsch et al., 2008).

IHE in Kombination mit Trainingseinheiten in Hypoxie wird als intermittierendes hypoxisches Training (IHT) bezeichnet. (Millet et al., 2010) Die Steigerung der körperlichen Leistungsfähigkeit ist dabei als die Folge morphologischer Veränderungen der belasteten Muskeln, wie z.B. eine gesteigerte Kapillarisation, ein erhöhter Myoglobingehalt oder eine größere Anzahl an Mitochondrien zu verstehen. Demgegenüber stehen keinerlei Veränderungen nach IHT auf hämatologischer Ebene, in den meisten Studien (Millet et al., 2010).

Als besondere Trainingsform hierbei gelten wiederholte „all out“ Sprints, die in der Literatur als repeated sprints under hypoxic conditions (RSH) definiert werden (Luks et al., 2021).

MERKE

Das Konzept LL- TH mit den vorgestellten Variationen erfährt derzeit eine Art Trend. Viele Skilanglauf Nationen nutzen kurze vermehrte Hypoxieexpositionen um Anpassungseffekte auf muskulärer und zellulärer Ebene auszulösen.

Wiederholtes Sprinttraining in Hypoxie, RSH (engl.: repeated sprints under hypoxia)

Seit 2013 werden in der Literatur vermehrt kurze intensive Sprintvarianten als eine Variante der Trainingsgestaltung im Höhenttraining beschrieben, die bis dato nicht praktiziert wurden. Das wiederholte Sprinttraining unter Hypoxiebedingungen (kurz RSH) vereint 10- / 20- / 30- bis hin zu 60-sekündige „all out“- Sprints mit zeitweiligen Erholungsphasen von mehreren Minuten Länge.

Exemplarisch wird in diesem Zusammenhang, eine Studie der französischen Arbeitsgruppe von Prof. Millet vorgestellt. Faiss et al. (2015) untersuchten dabei den Einfluss von RSH in der Doppelstockschubtechnik unter hypobarer bzw. normobarer Hypoxie auf die Leistungsfähigkeit. An 17 Skilangläufern wurde hier ein zweiwöchiges Doppelstock-Ergometer-Training mit insgesamt 6 Trainingseinheiten á 20 Sprints durchgeführt (vgl. Abb. 14).

Dabei wurden zwei Gruppen gebildet. Eine Gruppe führte wiederholte Sprints in Normoxie (300m u.M.) durch, die Andere in künstlicher Hypoxie (3000m ü.M.) durch das Einatmen höhensimulierter Luft mit dem Altitrainer-Gerät durch.

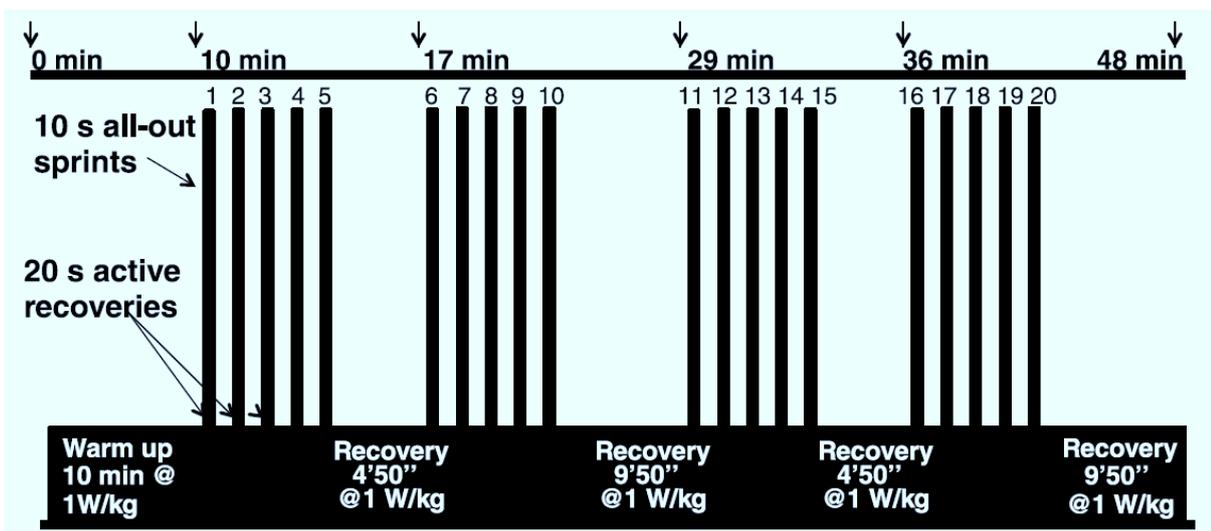


Abb. 14. Schematische Darstellung einer RSH-Einheit (Faiss et al., 2015)

Beide Gruppen konnten nach der Intervention eine höhere Leistung (in Watt) am Doppelstock-Ergometer zeigen. Im Vergleich zur normobaren Gruppe konnte die Gruppe, die unter

hypoxischen Bedingungen trainierte nach der Untersuchung eine signifikante Steigerung der Anzahl ihrer durchgeführten Sprints zeigen. Damit wurde eine langsamer eintretende bzw. verzögerte Erschöpfung nach einer derartigen Trainingsintervention unter hypoxischen Bedingungen belegt.

Diese Ergebnisse zeigen Parallelen zur ersten Studie auf dem Gebiet der RSH von Faiss et al. (2013) bei der ähnliche „all out“- Sprints mit Radfahrern durchgeführt wurden. Darin konnten signifikanten Verbesserungen der maximalen Sprintleistung und der Ermüdungsresistenz (Anzahl der durchgeführten Sprints) bei einer RSH Gruppe im Vergleich zu einer Gruppe, die unter Normalbedingungen trainierte, nachgewiesen werden (Faiss et al., 2013).

Millet et al. (2019) weisen in ihrem Review zu RSH darauf hin, dass derzeit ein großes Interesse an dieser Thematik besteht. Lediglich 2 von 25 internationalen Studien aus den vergangenen fünf Jahren zeigten keine leistungssteigernden Effekte.

Kurzaufenthalte in Höhenlagen

Da in der Trainingspraxis die klassischen Empfehlungen von mindesten 3 Wochen Höhent Aufenthalt bzw. Höhent training aus verschiedenen Gründen oft nicht realisiert werden können, beschäftigen sich wissenschaftliche Arbeitsgruppen u.a. mit den Auswirkungen von Kurzaufenthalten in geringen oder mittleren Höhen.

In Zeiträumen zwischen 10 und 12, maximal 15 Tagen wird dabei das Verhalten von Herzfrequenzen, ventilatorischen Parametern, Laktatkonzentrationen oder die Sauerstoffsättigung (SpO_2) zu definierten Zeitpunkten untersucht. Ziel dieser Kurzinterventionen ist, individuelle Reaktionen bzw. Verläufe von einfach messbaren Parametern in der Akklimatisationsphase der Sportler abzubilden. So zeigten z.B. Bahensky und Kollegen (2020) an einer Gruppe von 14-18-jährigen Mittel- und Langdistanz Läufern vielversprechende Reaktionen / Steigerungen bei der VO_{2max} (+13,6 %) oder der Laufgeschwindigkeit bei fixen Laktatkonzentrationen (+5,9 - 9,6 %) (Bahensky et al., 2020).

Darüber hinaus kann z.B. ein 10-tägiges Training in Höhen bis 1800 Metern gewisse Vorteile bieten, ohne die potenziellen Nachteile des klassischen Höhent trainings in Kauf nehmen zu müssen, wie z. B. die Abnahme der absoluten Trainingsintensität (Diebel et al., 2017). Insofern aus logistischen Gründen keine Zeit für eine optimale Akklimatisation zur Verfügung steht, gibt es Empfehlungen zu sub-optimalen Alternativen, die bei Foss et al. (2017) als kurzfristige Anreisestrategie beschrieben werden und in einem Zeitfenster zwischen 2h und 14h liegen. In der Untersuchung zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Ausdauerleistungsfähigkeit zwischen der 2h und der 14h Gruppe, in Bezug auf das Ergebnis eines 20km Zeitfahrens am Radergometer (Foss et al., 2017).

2.2 Zusammenfassung der Konzepte

Unter Berücksichtigung der Literatur bietet das Konzept LH-TL das größte Potential hinsichtlich einer nachgewiesenen Wirkung von Training in natürlichen Höhen. Die Vorteile gegenüber dem klassischen LH-TH konnten bei der wohl bekanntesten Studie zu LH-TL von Levine & Stray-Gundersen (1997) gezeigt werden.

Trotz einer Vielzahl von positiven Studienergebnissen sollte die Anwendung des jeweiligen Konzeptes immer Athleten-bezogen gewählt werden, d.h. Trainer und Sportler beraten im Vorfeld gemeinsam über den Einsatz des jeweiligen Konzeptes bzw. über den Aufenthalt in einer gewissen Höhenlage. Im Hinblick auf die Praktikabilität des Konzepts LH-TL muss der Zeitaspekt (18-21 Dauer) und mögliche Ermüdungserscheinungen des Sportlers unbedingt berücksichtigt werden.

Aufgrund der dargestellten Akklimatisationsprozesse während und nach Höhengaufenthalten ist ein optimale Wettkampfleistung sehr wahrscheinlich, wenn das LH-TH Konzept angewendet wurde und die Akklimatisierung auf derjenigen Höhe stattfand, in der auch der Wettkampf stattfindet (Chapman et al., 2016). währenddessen sich eine Akklimatisierung an höhere Höhen als die Wettkampfhöhe, negativ auf die Leistung auswirkt (Chapman et al., 2016).

Wird die Hämoglobinmasse (tHbmass) als Kriterium zur Bewertung eines wirksamen Höhentrainings herangezogen, dann handelt es sich in den meisten Fällen um Studien, in denen das LH-TH oder LH-TL Konzept verwendet wurde. (Jacobs et al., 2012; Wehrlin et al., 2016). Strittig ist jedoch, welches der verschiedenen Höhenkonzepte die beste Wirkung auf die Blutbildung erzielt. Bei der Analyse verschiedener Höhentrainingsstudien zeigten Schmidt & Pommer (2008), dass die tHb um ~7% gesteigert werden kann, wenn die Aufenthaltsdauer oberhalb von 2000m mindestens 14h / Tag über ca. 3 Wochen beträgt (Schmidt & Prommer, 2008). Zumeist liegen die durchschnittlichen Zuwachsraten von tHb oder RCV jedoch niedriger. Bei Wehrlin et al. (2016) werden sie mit 3-5% für moderate Höhen angegeben.

Das Konzept LL – TH, mit den vorgestellten Variationen zur Hypoxie in Ruhe und Belastung, erfährt derzeit einen gewissen Trend. Als einer der Hauptgründe kann vor allem die Praktikabilität bzw. die schnelle Realisierung gesehen werden. Viele Skilanglauf Nationen nutzen kurze vermehrte Hypoxieexpositionen um Anpassungseffekte auf muskulärer und zellulärer Ebene auszulösen.

Den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen zufolge können kurze und intensive Trainingseinheiten, für die LL-TH charakteristisch ist, größere Anpassungen des Skelettmuskulgewebes über den O₂-Sensing-Weg (Kapillar-zu-Faser-Verhältnis, Faserquerschnittsfläche, Myoglobingehalt und die Aktivität oxidativer Enzyme) auslösen, als vergleichbare Trainingseinheiten in Normoxie. (Girard et al., 2020; Millet et.al., 2010; Vogt & Hoppler, 2010)

Der Stimulus zur Blutneubildung konnte mit dieser intermittierenden Hypoxieform jedoch nicht nachgewiesen werden (Wonisch et al., 2017).

Bei der Frage, ob natürliche oder künstliche Hypoxie einen mehr oder weniger großen Einfluss auf die Leistungssteigerung von Eliteathleten ausübt, zeigten Bonetti & Hopkins (2009) in einer Metaanalyse einen Vorteil der natürlichen Hypoxie von 4% gegenüber 0,6-1,4% bei künstlichen Hypoxie (Bonetti & Hopkins, 2009).

3 Planung und Gestaltung eines Höhentrainingslagers

Für die Durchführung eines Höhentrainings (HT) ist nicht nur der Zeitraum des Aufenthalts in der Höhenlage zu planen. Eine strukturierte Vor- und Nachbereitungsphase mit einer sich anschließenden Transformation sowie einer Phase der Rückanpassung sind ebenfalls von großer Bedeutung.

Grundsätzlich können drei Einsatzbereiche des HT unterschieden werden:

- (1) Trainieren in der Höhenlage
- (2) Wettkämpfe unter Höhenbedingungen
- (3) Einsatz des HT für die Verbesserung der Leistungsfähigkeit auf Meereshöhe bzw. im Flachland.

Insofern die bedeutenden Wettkämpfe der Saison in Höhenlagen zwischen 1500 bis 3000m stattfinden, ist eine Höhenanpassung unbedingt erforderlich.

Eine zentrale Stellung nimmt die mehrfach angesprochene „Höhendosis“ mit Dauer und Höhenlage ü.M. ein. Darüber hinaus sind die Vorgeschichte des Höhentrainings, individuell angepasste Trainingsreize, die in der Höhe verbrachte Trainingszeit, Alternativen in geringerer Höhe zu trainieren und das Timing bis zum Zeitpunkt des Wettkampfes nach dem Trainingslager wichtige Faktoren, die bei der Gestaltung des Trainingsprogramms in moderater Höhe zu berücksichtigen sind (Saunders et al., 2019).

Diese Überlegungen spielen eine entscheidende Rolle um Übertraining oder Detraining (Mehrfachbedeutung „Detraining“ in der Trainingswissenschaft; hier: trainingsbedingter Verlust der sportlichen Leistungsfähigkeit), sowie medizinischen Komplikationen während oder nach HT möglichst aus dem Wege zu gehen (Villiger et al., 2005; Friedmann-Bette, 2008).

Eine mögliche Herangehensweise zur allgemeinen Durchführung eines HT zeigt die Abbildung 15. Ein Schema, welches sich in den letzten 20 Jahren in der int. Fachliteratur etabliert hat und als Rahmen für eigene Konzepte von verschiedenen Nationen verwendet wird. Inhaltliche Empfehlungen zur Gestaltung der einzelnen Phasen werden zu einem späteren Zeitpunkt im Text gegeben.

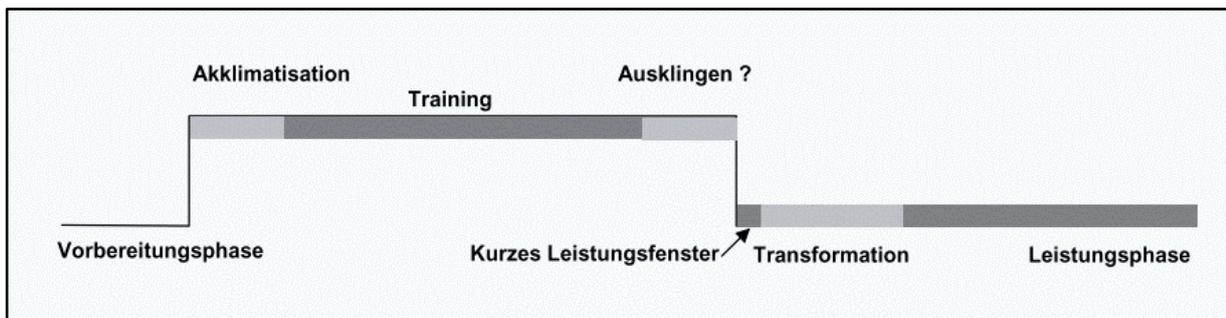


Abb. 15. Konzeption eines Höhentrainingslagers, nach Reiss 1990 / 1998 (aus Villiger et al., 2005)

3.1 Periodisierung im Höhentaining / Modelle im Höhentaining

Die Periodisierung / die Strukturierung eines (oder mehrerer) Höhentrainingslager während der Saison ist sorgfältig zu planen. Vor allem darf dabei die zusätzliche Beanspruchung, die das Training in der Höhenlage auslöst, keinesfalls unterschätzt oder vernachlässigt werden (Saunders et al., 2019).

Wenn z.B. der Frage nach dem optimalen Zeitraum bzw. der idealen Dauer der Akklimation nachgegangen wird, kann aus der Literatur ein einheitlicher Konsens abgeleitet werden, der jedoch in der Praxis meist in verkürzter Form auftritt.

Grundsätzlich werden lange Akklimationszeiträume bis zu einem Maximum von 14 Tagen empfohlen. In diesem Zusammenhang wird immer wieder auf die Studie von Schuler et al. (2007) verwiesen, die auf einer Höhe von 2340m mit Radsportlern durchgeführt wurde. In den Kenngrößen VO_{2max} und Leistung wurde am ersten Tag des Höhenaufenthalts eine Reduktion von 13 % und 26 % festgestellt. Die Leistung wurde dabei als „Zeit bis zur Erschöpfung bei 80 % der maximalen Leistungsabgabe im Vergleich zur Meereshöhe“ definiert. Erfreulicherweise stiegen, wie an anderer Stelle im Text bereits angeführt, innerhalb der ersten 7 Tage die VO_{2max} wie auch die Leistung wieder (VO_{2max} +3%; Leistung +6%). Zwischen Tag 7 und Tag 14 konnten weitere Anstiege in der VO_{2max} von ca. 5% sowie in der Leistung von ca. 6% verzeichnet werden (Schuler et al., 2007).

Bsp.: Ein Athlet, der in der allgemeinen Vorbereitungsphase an einem HT teilnimmt, bspw. hohe Trainingsumfänge bei niedrigen bis moderaten Intensitäten realisiert, kann somit die hämatologischen Effekte des hypoxischen Reizes in den Vordergrund stellen (Saunders et al., 2019).

Im Trainingsalltag müssen vor allem logistische und praktische Gesichtspunkte z. B. Teilnahme an wichtigen Wettkämpfen abgewogen werden und so wird der Akklimation meist nur 4-7 Tage eingeräumt, obwohl längere Akklimationszeiten als optimaler angesehen werden (Sandbakk, 2021).

Zusätzlich wird in diesem Zusammenhang auf weitere Literaturquellen aus den 90er Jahren von Reiss und Kollegen (1999) verwiesen. Dort werden des Öfteren kürzere Akklimatisierungszeiten propagiert, die durchaus für höhentrainingserfahrene Athleten gelten könnten, oder wenn eine mögliche Wettkampfteilnahme in Höhenlage bevorsteht. (vgl. Abb. 16).

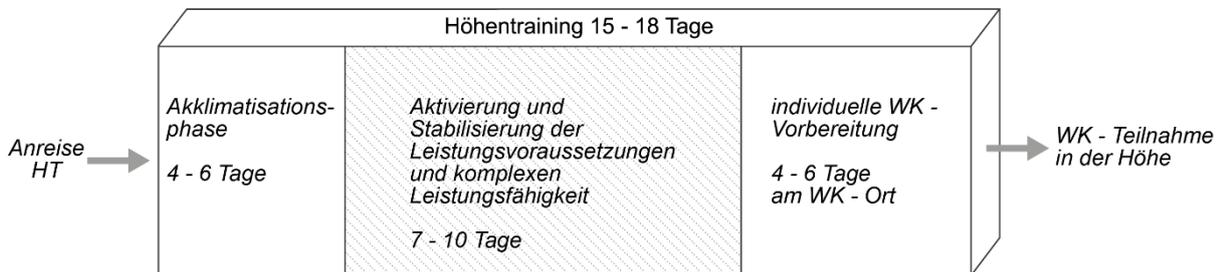


Abb. 16. Beispiel eines Höhentrainingslagers, wenn die wichtigen Wettkämpfe der Saison unter Höhenbedingungen stattfinden, HT = Höhentraining, WK= Wettkampf (modifiziert nach Reiss et al. 1999)

Die Thematik der unmittelbaren Wettkampfvorbereitung in Kombination mit vorangestellten HT, greifen Sandbakk und Kollegen (2021) in ihrer aktuellen Publikation auf und schlagen vor, dass Athleten ihre Höhenakklimatisierung unter Berücksichtigung folgender Fragen planen:

- Wie viele Tage vor den Wettkämpfen sollten in der Höhe verbracht werden, um eine optimale Akklimatisierung zu erreichen?
- In welcher Höhe (in Bezug auf die Höhe, in der der Wettkampf stattfindet) sollte gelebt und trainiert werden?
- Wie sollte sich die Trainings- und Erholungsroutine während der Akklimatisierung ändern, gegenüber der, die normalerweise auf Meereshöhe / Tallage angewendet wird?

Um eine Vorstellung zu schaffen, wie sich die aerobe Leistungsfähigkeit im HT und in der sich anschließenden Phase der Re-Akklimatisation verhält, wird eine schematische Darstellung von Fuchs & Reiss aus 1990 verwendet.

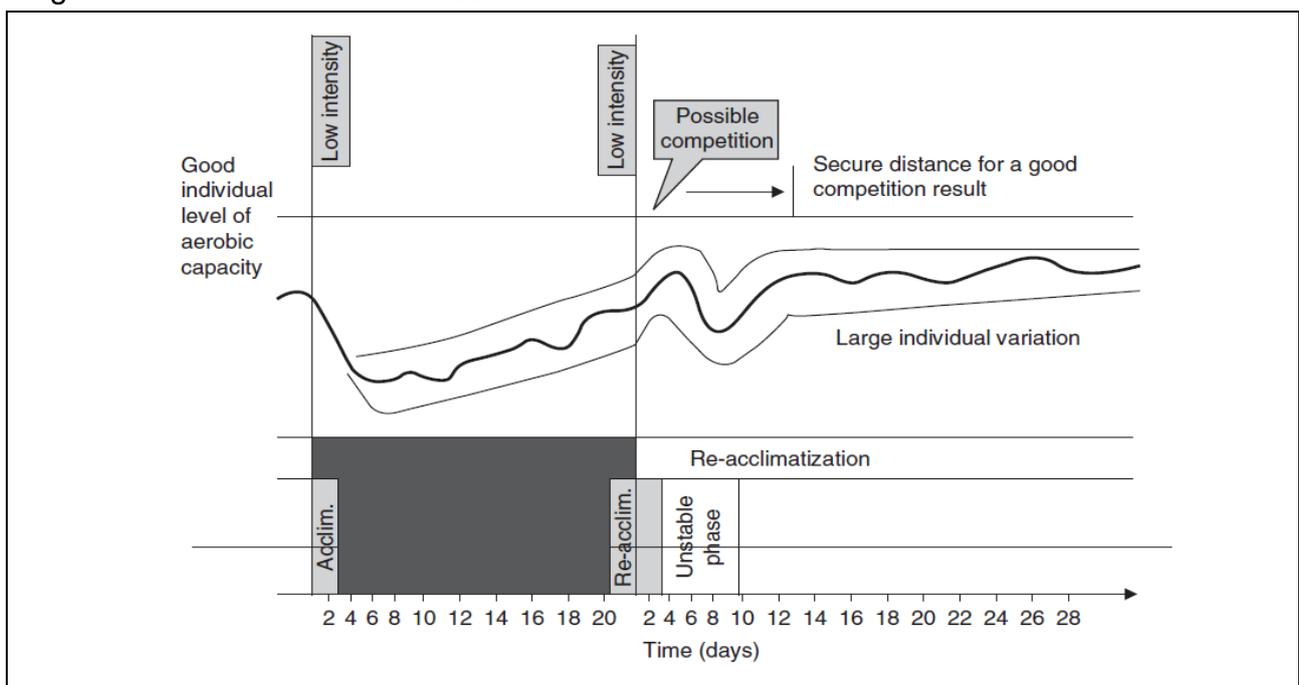


Abb. 17. Schematische Darstellung der Entwicklung der aeroben Kapazität während und nach "live-high train-high" (nach: Fuchs & Reiss, 1990, aus: Millet et al., 2010)

Das dunkelgrau dargestellte HT wird von 2 kurzen „low-intensity“ Phasen eingerahmt für die 2-3 Tage zur Akklimation bzw. Re-Akklimation vorgeschlagen werden. Die Leistungsfähigkeit (aerobic capacity) sinkt anfangs, aufgrund der bereits erläuterten Bedingungen (vgl. Kapitel 2). Über den Verlauf des HT's kommt es zu einer kontinuierlichen Verbesserung der sportlichen Form, welche durch ein wellenförmiges Verhalten mit gewissen Streubreiten gekennzeichnet ist und einer hohen individuellen Variation unterliegt. Die ersten Tage der Re-Akklimation nach dem HT werden in der Literatur als „instabile Phase“, „depressive Phase“ oder „phase of poor performance“ bezeichnet (vgl. Kap 3.2.) Eine Teilnahme an Wettkämpfen wird nicht empfohlen. Zu welchem Zeitpunkt sich ein erhöhtes Leistungsniveau ausprägt, ist individuell verschieden. Der Versuch einer Eingrenzung dieser Phase auf Basis der Tage nach dem HT erfolgt in Kapitel 3.2.

Training / Trainingsgestaltung in der Vorbereitungsphase (pre- altitude phase)

Die Anreise zur entsprechenden Höhenlage sollte in einer guten konditionellen Situation, v.a. mit guten aeroben Leistungsniveau und Gesundheitszustand erfolgen. In den letzten 7 Tagen vor Beginn des HT sollte der Gesamttrainingsumfang / -volumen deutlich reduziert sein, v.a. damit keine trainingsbedingten Ermüdungszustände das HT in der 1. Trainingswoche beeinflussen. Intensitäten und Pausengestaltung können innerhalb der Umfangsreduktion beibehalten werden (Mujika et al., 2019; Sharma et al., 2018).

Training / Trainingsgestaltung 1.-3. Trainingswoche

In den ersten Tagen in der Höhe (z.B. 2–3 Tage; 5 -7 Tage, Zahl variiert individuell und in Abhängigkeit der Aufenthaltshöhe) sollte dem Körper Zeit gegeben werden, sich an die neuen Bedingungen anzupassen. In dieser Phase sollte nur mit niedriger Intensität trainiert und auf anaerobe Belastungsformen verzichtet werden (Wehrlin, 2005).

Eine anfänglich zu hohe Trainingsbelastung mit zu wenig Rücksicht auf verlängerte Regenerationszeiten kann tiefgreifende negative Auswirkungen auf die gesamte Trainingsqualität und Leistung von Spitzensportlern haben (Mujika et al., 2019).

Es herrscht eine erhöhte Aktivität innerhalb des sympathischen Nervensystems, wie auch im kardialen und respiratorischen System (vgl. Kap. 2). Verschiedene didaktische Maßnahmen sind zu empfehlen. Den Sportlern sollte z.B. geraten werden, ihre Flüssigkeitszufuhr zu erhöhen oder ihr Körpergewicht jeden Tag zu kontrollieren.

Der Zeitraum ab dem 5.-7. Tag kann als Beginn der Haupttrainingsphase betrachtet werden. Die Intensitäten sollten vorerst im moderaten I1 oder I2-Bereich liegen.

Zu Beginn der 2. Woche sollte die Trainingsbelastung (TB) erhöht werden. Die ersten intensiveren Abschnitte mit anaeroben Anteilen können in der 2. Woche umgesetzt werden.

In Woche 3 findet die höchste Trainingsbelastung statt. (vgl. Abb. 18) Sie beinhaltet das Zusammenspiel des Trainingsumfangs inklusive der gewählten Intensitäten und einer leicht verkürzten Pausengestaltung, im Vergleich zur Woche 1 (vgl. Tab. 1).

In der Endphase der HT sollte auf ein angemessenes ‚Tapering‘ Wert gelegt werden. Diese letzten Tage (ca.2-3) sind entscheidend für eine erfolgreiche Leistung unmittelbar nach dem Höhengaufenthalt (Saunders et al., 2019).

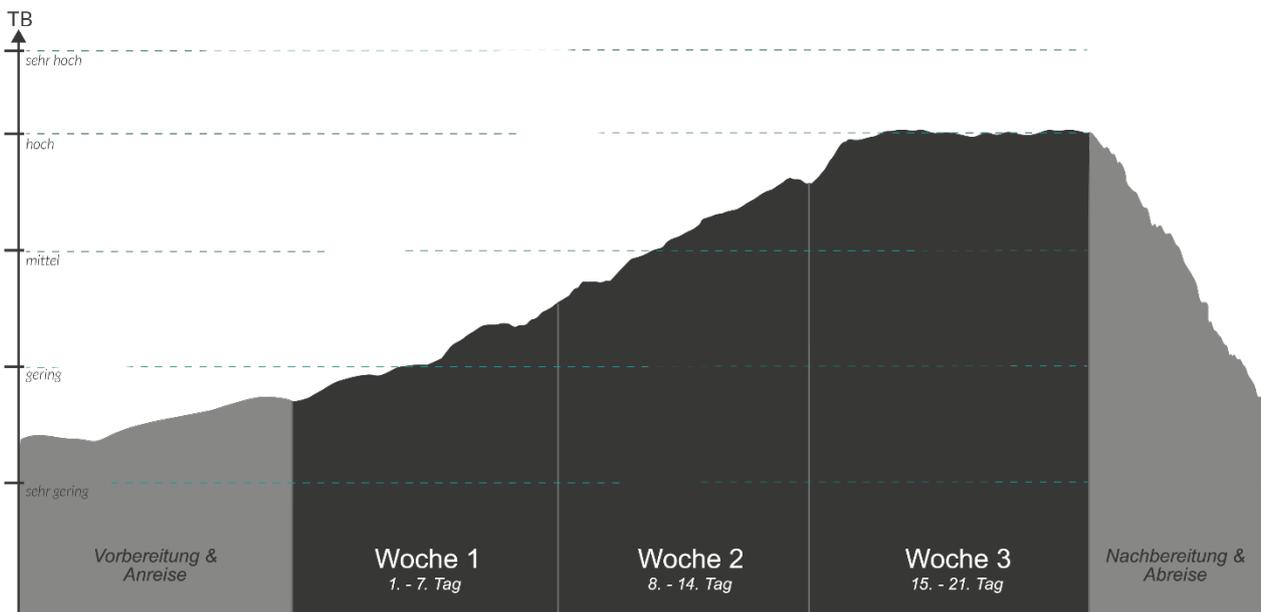


Abb. 18: Gestaltung eines HTL nach Wochen mit ansteigender Trainingsbelastung (TB), höchste TB in Woche 3 (eigene Grafik, modifiziert nach Millet, 2010)

In der Variante 2 (vgl. Abb. 19) wird ebenfalls eine kontinuierlich ansteigende TB beschrieben. Hierbei wird besonders auf Belastungsspitzen (weiße Spitzen) der 3. Woche in Form von intensiven anaeroben Anteilen gegen Ende des HT hingewiesen. In der praktischen Anwendung werden dabei vorwiegend HT-erfahrene Athleten angesprochen. Im LH-TH oder LH-TL Konzept besteht die Möglichkeit, intensive Einheiten im Tal oder kurze intensive Einheiten nach dem Konzept der wiederholenden Sprints unter Hypoxie (RSH) durchzuführen.

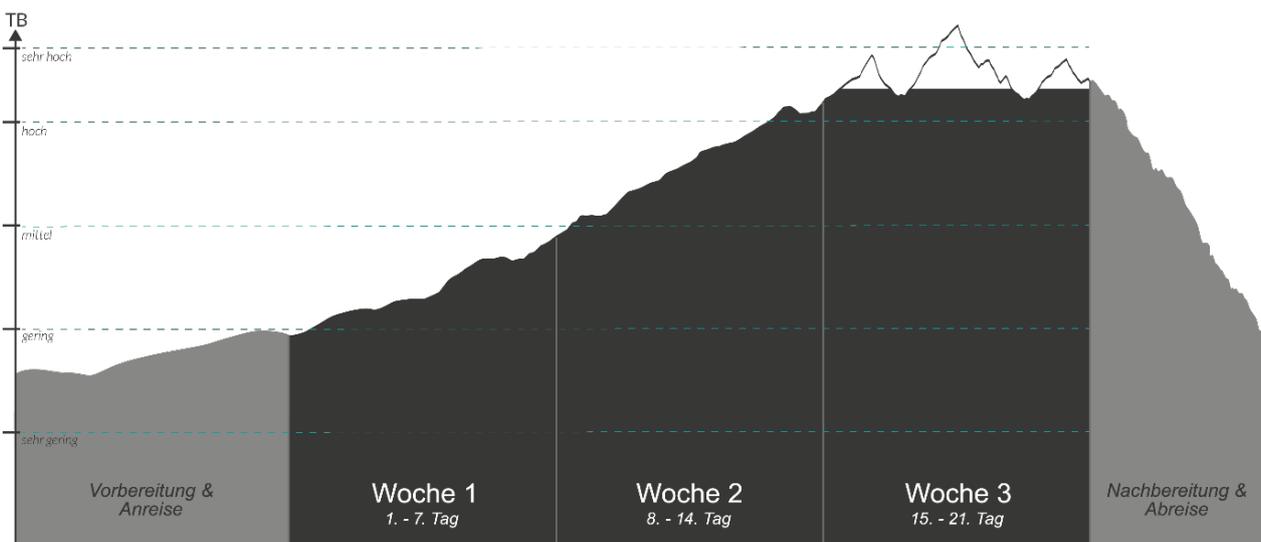


Abb. 19. Gestaltung eines HT nach Wochen, ansteigende TB (Trainingsbelastung) inkl. intensive Einheiten in Woche 3 markiert als weiße Spitzen; z.B. repeated sprints unter Hypoxie (eigene Grafik, modifiziert nach Millet, 2010).

Tab. 1. Empfehlung zur Gestaltung der Trainingswochen in Höhenlage (zusammengefasste Daten aus: Mujika 2019; Sharma 2018; Wehrlin, 2005)

WOCHE 1		
Trainingsumfang (TU)	Trainingsintensität	Pausengestaltung
<p>erster Höhengaufenthalt eines Athleten / konservativer Ansatz: 20% reduziertes Trainingsvolumen, verglichen mit dem Trainingsvolumen im Flachland, besonders in den ersten 2-3 Tagen</p> <p>erfahrene Athleten: Toleranz von höheren Trainingsumfängen ist gegeben</p>	<p>Überwiegend niedrige (moderate) Intensitäten, möglichst alaktazide Arbeit, Blutlaktatwerte unter (höchstens: an) der Laktatschwelle</p> <p>andere Empfehlung / Formulierung: niedrige bis sehr niedrige Intensitäten unter der ventilatorischen Schwelle VT1</p>	<p>Relation von Belastung zu Erholung vergrößern</p> <p>Ruhezeiten zwischen den Einheiten um 50-100% verlängern</p>
WOCHE 2		
Trainingsumfang (TU)	Trainingsintensität	Pausengestaltung
<p>Normaler bis hoher TU</p> <p>kann über den TU im Tiefland hinaus gesteigert werden</p>	<p>erster Höhengaufenthalt eines Athleten / konservativer Ansatz: Überwiegend niedrige Intensitäten an oder unter der Laktatschwelle</p> <p>erfahrene Athleten: neuere Daten aus 2018 legen nahe, dass hohe Trainingsintensitäten (I4-Bereich) toleriert werden können, Schwellentraining oder VO2max Training realisierbar</p> <p>Bei Intervallen: 2 - 3min in sehr hohen Intensitätsbereich möglich (I5), wenn möglich komplettes Intervalltraining in niedrigeren Höhen absolvieren</p>	<p>Relation von Belastung zu Erholung kann verkürzt werden</p> <p>ABER: um 50% längere Ruhezeiten im Vergleich zum Flachlandtraining</p>
WOCHE 3		
Trainingsumfang (TU)	Trainingsintensität	Pausengestaltung
<p>Normaler bis hoher TU, reduzierter TU in den letzten 2-4 Tagen, abhängig vom Timing bis zum Wettkampf</p> <p>instabile Phase / Übergangsphase (in Tagen) beachten, s.Abb.19</p>	<p>Intensitäten gleich denen auf Normalhöhe</p> <p>Bei Intervallen: bis zu 4min im sehr hohen Intensitätsbereich möglich (I5)</p> <p>wenn möglich: reines Intervalltraining in niedrigeren Höhen absolvieren</p>	<p>Relation von Belastung zu Erholung immer noch vergrößert</p> <p>Ruhezeiten zwischen den Einheiten um 25-50% verlängern, im Vergleich zum Flachland</p>

Im „Norwegischen Modell“ nach Madsen (Wilber, 2007) wird das Höhenttraining mit einer Gesamtdauer von 21 Tagen beschrieben und in drei Phasen untergliedert (vgl. Abb. 20). Der Anpassung wird in der initialen Phase ein relativ kurzer Zeitraum eingeräumt, der aber im Basistraining der Phase 2 mit Hilfe von aeroben Training, noch mehrere Tage fortgesetzt wird. Den Schwerpunkt des Konzepts bildet die Phase 2, die mit 17 Tagen geplant wird. Abschließend werden in Phase 3 zwei Tage für die Regeneration vorgeschlagen.

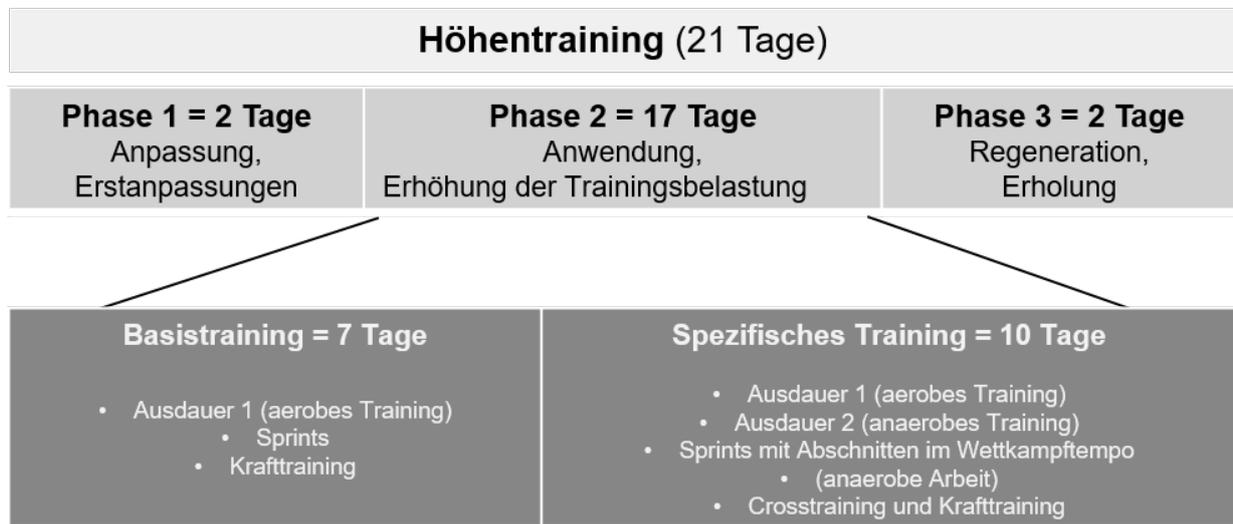


Abb. 20. Strukturierung eines HT im „Norwegischen Modell“ (Wilber, 2007)

3.2 Phasen nach dem Höhenttraining / Rückanpassung

Eine der wichtigsten Fragen im Zusammenhang mit Höhenttraining und einer darauffolgenden Wettkampfteilnahme, ist die Frage nach dem Timing zwischen dem Ende des Höhenaufenthalts und dem Zeitpunkt der bestmöglichen Leistungsfähigkeit. In der Übersicht von Issurin (2007) werden verschiedene Abschnitte (in Tagen) der Re-Akklimatisierung aufgeführt. In Hinblick auf die Aktualität dieser unterschiedlichen Phasen, besteht Konsens zu aktuellen Review's von Burtscher et al. (2018) und Mujika et al. (2019).

Tab. 2: *Periodisierung / zeitliche Abfolge des „Athletenzustandes“ mit Beschreibung des Leistungsvermögens während der Re-Akklimatisierung nach dem HT (Issurin, 2007)*

Tage (nach HT)	Änderung des „Athletenzustandes“ und Beschreibung der möglichen Leistungsfähigkeit
1.- 2. Tag	Günstiger Zustand, es ist möglich, zu konkurrieren und gute Leistungen zu erzielen
3.- 7. Tag	reduzierte Trainingskapazität, geringe Wahrscheinlichkeit etwaige Spitzenleistungen zu erreichen
3.- 10. Tag	depressive Phase, Teilnahme an Wettkämpfen wird nicht empfohlen
14. – 18.Tag	kontinuierliche Steigerung der Trainingskapazität, Erreichen von Spitzenleistungen möglich
12. – 28. Tag	Verbesserung der allgemeinen und sportartspezifischen Reaktionen, erfolgreiche sportliche Leistung
37. – 46. Tag	verzögerte Welle der Verbesserung des „Athletenzustandes“, hohe Wahrscheinlichkeit erfolgreicher Leistungen

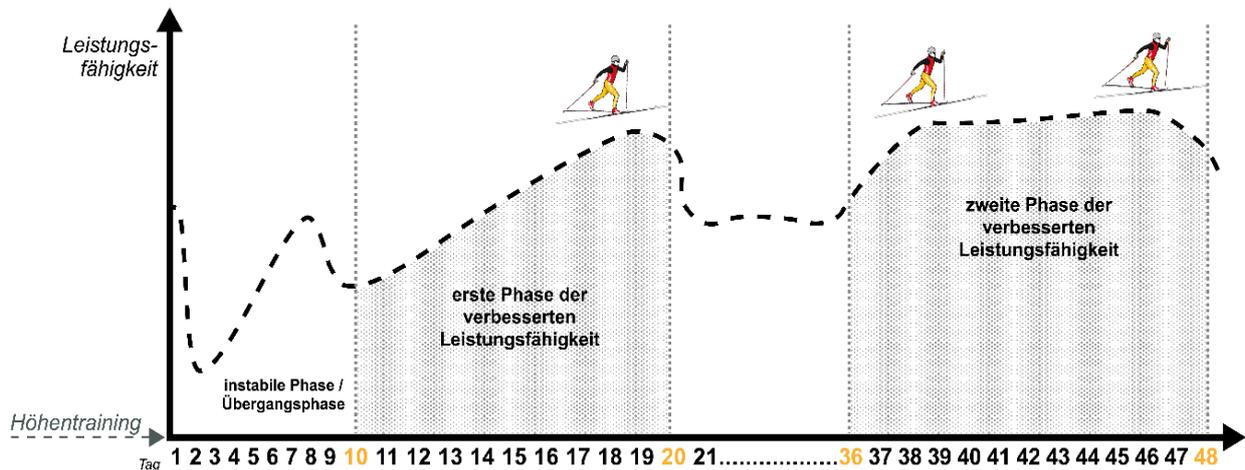


Abb. 21. Dynamik der Leistungsfähigkeit nach dem Höhentraining (eigene Grafik, modifiziert nach Suslov, 1994)

Die meisten Empfehlungen basieren auf Empfehlungen erfolgreicher Nationaltrainer oder Höhentraining Experten mit dem Konsens, dass ein „optimales Zeitfenster“ in einem Bereich zwischen 2-3 Wochen nach HT liegt (Chapman et al., 2014).

Weiterhin stellen Sandbakk und Kollegen (2021) drei Strategien vor, wie Athleten die letzten Wochen der Vorbereitung von Wettkämpfen in Höhenlagen auf 1700m (hier: Olympische Winterspiele 2022) gestalten könnten (vgl. Abb. 22). Für Strategie 1 und 2 kann ein Bezug zur Studie von Schuler et al. (2007) hergestellt werden. Darin wurde verdeutlicht, dass Sportler die Ausdauerwettkämpfe in geringen bis mittleren Höhen bestreiten wollen, sich mindestens 14 Tage vor dem Wettkampf auf der entsprechenden Höhe akklimatisieren sollten, damit sichergestellt wird, das anfängliche Einbußen in VO_{2max} und Leistung wieder auf das Ausgangsniveau zurückkehren können. Die 3. Strategie beinhaltet das Leben und Trainieren in einer Höhenlage oberhalb von 2000m (14-21 Tage), um die Blutneubildung zu fördern, gefolgt von 7-10 Tagen auf ~ 1700 m (Sandbakk et al., 2021).

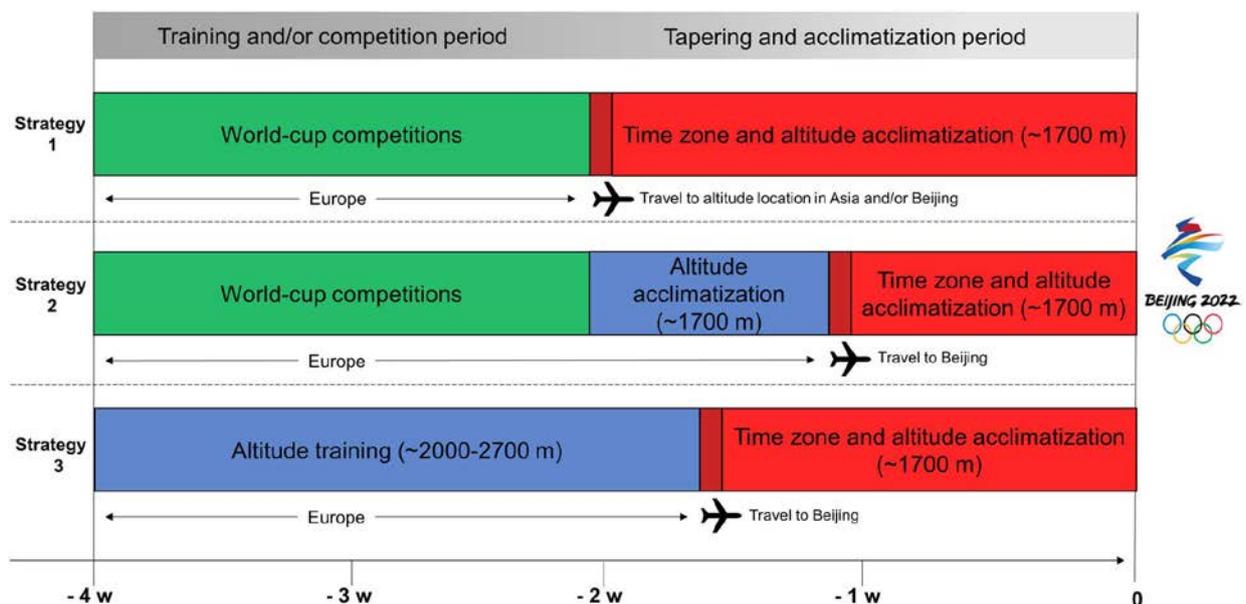


Abb. 22. Darstellung von drei alternativen Strategien für die letzten Wochen der Vorbereitung auf die Olympischen Winterspiele in Peking 2022 (Sandbakk, 2021)

3.3 Höhengedächtnis – hypoxic memory

Im Hinblick auf eine langfristige Planung möglicher Höhentrainingslager bzw. Höhenaufenthalte, genießt die Theorie zum „hypoxic memory“, dem Höhengedächtnis, seit 3-4 Jahren eine erhöhte Aufmerksamkeit. Eine amerikanisch-asiatische Forschergruppe veröffentlichte 2017 im renommierten Fachjournal „Nature Communications“ eine Arbeit zum Verhalten der Erythrozyten-Reaktion während der Akklimatisierungs-Phase bei sich wiederholenden Höhenaufenthalten. Die Hauptaussage dieser Studie besteht darin, dass die hämatologische Anpassung („das Blut betreffend“) bei zweiter Höhenexposition schneller zu erfolgen scheint (Song et al., 2017).

Ein Beispiel der verbesserten hämatologischen Reaktion im Bereich der totalen Hämoglobinnasse geben Saunders et al. (2019) bei der Betrachtung von 4 australischen Eliteschwimmern, die 8 Höhentrainingslager innerhalb von 4 Jahren durchführten (vgl. Abb. 22). Die Autoren verwenden die Formulierung „*there is also a belief that every subsequent camp at altitude has some form of memory*“ [...]. Es wird also der Gedanke geäußert, dass jedes nachfolgende Höhentrainingslager eine Art Gedächtnis aktiviert, wodurch das Training jedes Mal leichter zu sein scheint, wenn ein Athlet ein Trainingslager in der Höhe absolviert (Saunders et al., 2019). Diese günstigen Effekte im Sinne der „hypoxic memory“ können unterstützend herangezogen werden, um die Bedeutung einer mehrmaligen Durchführung von HT innerhalb des jährlichen Saisonverlaufes zu untermauern. In der aktuellen Übersichtsarbeit von Mujika et al. (2019) wird „hypoxic memory“ ebenfalls thematisiert und auf die Studie von Song et al. (2017) verwiesen.

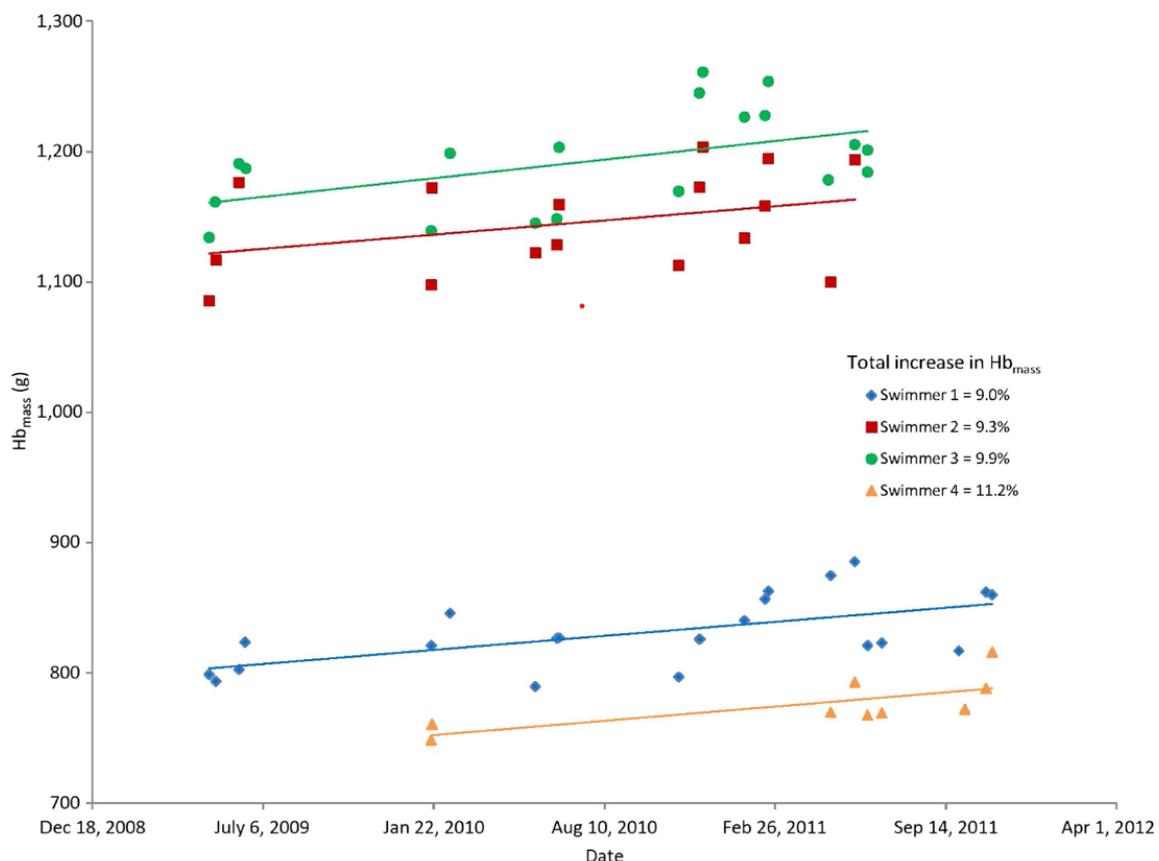


Abb. 22. Entwicklung der Hb-Masse (in g) bei vier australischen Eliteschwimmern über einen Zeitraum von 8 Höhentrainingslagern innerhalb von 4 Jahren (Saunders et al., 2019)

3.4 Trainingssteuerung / Monitoring im Höhentaining

Die Trainingssteuerung im HT sollte unter Beachtung des individuell unterschiedlichen Sportlertyps vorgenommen werden. Diesbezüglich ist eine Differenzierung von höhen-erfahrenen zu höhen-unerfahrenen Athleten zu empfehlen. Um den individuellen Effekt eines Höhentrainings auf den unterschiedlichen Ebenen abzubilden und ggf. mögliche Fehler zu erkennen, ist es von entscheidender Bedeutung ein systematisches Monitoring durchzuführen. Dafür sind eingangs, didaktische und pädagogische Maßnahmen durch den Trainer oder den Betreuer zu platzieren (Mujika et al. 2019).

Werden z.B. zwei Höhentrainingslager im Jahr durchgeführt, verschiedene Parameter gemonitored und die Effekte mit leistungsdiagnostischen Maßnahmen oder Feldtests überprüft, so können nützliche Rückschlüsse für das Timing eines dritten Lehrgangs, im Sinne der UWV auf ein Großereignis gezogen werden. Bezogen auf die in Punkt 4.2. dargestellten Phasen im Nachgang eines Höhentrainings, scheint sich im Zeitraum zwischen dem 10. bis zum 20. Tag, ein Fenster der verbesserten Leistungsfähigkeit zu bilden. Unter Beachtung des gezeigten wellenförmigen Verlaufs der Leistungsfähigkeit, bietet sich eine Diagnostik in unterschiedlichen Formen, in diesem Zeitraum besonders an.

Nachfolgend werden einige objektive und subjektive Parameter vorgestellt, um die individuelle Trainingsbelastung zu überwachen, eine optimale Anpassung sicherzustellen und/oder unerwünschten Nebeneffekten wie z.B. Übertraining entgegenzuwirken (vgl. Tab 3). Aus praktischer Sicht ist es wichtig, dass nicht ein Parameter allein, sondern mehrere subjektive und objektive Marker betrachtet und bewertet werden. Weiterhin gilt die Empfehlung, dass sie möglichst mit geringem Aufwand und schnell zu erfassen sein sollten aber dennoch wissenschaftlich vertrauenswürdige Rückmeldungen geben (Sperrlich et al., 2016).

Tab. 3. Empfehlung zu verschiedenen Monitoring Parametern vor und während des Höhentrainings, XXX= hohe Priorität, XX =mittlere Priorität (Vortrag: Sperrlich, 2020)

Faktor/Bereich	Variable	Notwendigkeit
Höhentauglichkeit	Eisenhaushalt	XXX
	Gesundheitsscreening	XXX
Ungewollte höhenbedingte Nebeneffekte	Schlaf-Assessment	XXX
	Lebensqualität	XX
	Dehydrierung (Urindichte)	XX
	Ohrtemperatur	XX
	Ernährungsfragebogen	XX(X)
Höhenreaktion	SpO ₂	XXX
	HbMasse	XX
	Körpergewicht	XXX
	Ruhe HF	XXX
	HRV	XX
	Urindichte	XX(X)
	Harnstoff/CK	XX(X)
Trainingsvariablen	Je nach Sportart: GPS, RPE, Laktat, etc	XXX

Eine weitere hilfreiche Variante zur Ermittlung der Trainingsbelastung bietet die Kontrolle des subjektiven Belastungsempfindens während des Trainings, als auch nach den jeweiligen Einheiten mit Hilfe der sRPE-Skala von 1-10. Definitionsgemäß sollte unmittelbar bzw. innerhalb der ersten 30min nach Abschluss der Einheit das unmittelbare Feedback des Athleten eingeholt werden um den session RPE zu erhalten. (Foster et al., 1995; Foster et al., 2001) Für die Ermittlung von Belastungs- und Beanspruchungsverhältnissen gelten diese Techniken mit der daraus resultierenden Bestimmung des Training Loads (Trainingszeit in Minuten*session RPE) wie auch die Verwendung von weiteren Sub-Kategorien als äußerst praktikable Methoden. Diese Parameter sollte fortlaufend erhoben werden, um individuelle Sportlerprofile zu erstellen. Im Idealfall werden subjektive und objektive Parameter zur Steuerung herangezogen.

Einen derzeit besonders interessanten Monitoring-Parameter stellt die arterielle Sauerstoffsättigung (SaO₂ oder SpO₂ in %) dar. Die leicht durchzuführende Messung mittels Puls-oxymeter-Fingerclip kann Aufschluss über die aktuelle hämatologische Reaktion eines Athleten auf die Höhe geben. Im Längsschnitt ist sie als Akklimatisationsparameter anerkannt. Zusätzlich kann der Grad der Entsättigung des Blutes unmittelbar nach dem Training bestimmt und ebenfalls im Verlauf des HT betrachtet werden. Die SpO₂ in der Höhe aufrecht zu erhalten, steht in engem Zusammenhang mit der Aufrechterhaltung sowohl der VO_{2max} als auch der Leistung (Chapman et al., 2011).

Weitere objektive Parameter wie z.B. das Monitoring von Körpergewicht und -zusammensetzung, der Ruhherzfrequenz, des Blut- bzw. Serumharnstoffs, der Kreatinkinase-Konzentration und der Herzfrequenzvariabilität werden zur Beurteilung des Ermüdungszustands empfohlen, wenn der Frage nachgegangen wird, ob bei einem Athleten die Gefahr besteht, in eine trainingsbedingte Überbeanspruchung oder gar in den Zustand des Übertrainings zu geraten (Mujika et al. 2019).

Zusätzlich kann durch das Überwachen der Schlafqualität und -quantität einerseits Einschätzungen zum Wohlbefinden, andererseits eine Bewertung des Regenerationszustandes im HT äußerst nützlich sein. Die Verwendung von Schlaffragebögen stellt eine einfache und dennoch valide Methode zur Überwachung des Wohlbefindens von Sportlern dar. Aufgrund des zunehmenden Wissens über die Bedeutung des Schlafes, wird das Schlafmanagement immer beliebter bei Spitzensportlern, Trainern und Betreuungspersonal (Halson, 2014; Mujika et al., 2019).

4 Grundlagen der Sporternährung in mittleren Höhenlagen

Die besonderen Umweltbedingungen in der Höhe inklusive der zu realisierenden Trainingsanforderungen stellen auch besondere Herausforderungen für die Ernährung dar. Im folgenden Teil werden nur die wichtigsten zu berücksichtigenden Ernährungselemente hervorgehoben. Am Ende dieses Abschnitts werden verschiedenen Ernährungsstrategien in zusammengefasster Form dargestellt (vgl. Tab. 4). Eine umfassende Darstellung zu den wichtigsten Ernährungsthemen, die in niedrigen und mittleren Höhenlagen zu berücksichtigen sind, bietet das kürzlich veröffentlichte Review von Stellingwerff et al. vom November 2019.

Energiebedarf: In der Höhe ist der Gesamtenergiebedarf erhöht wohingegen der Appetit sehr häufig reduziert ist. Grundsätzlich wird auf eine gesteigerte Kohlenhydrat (KH) - sowie Proteinaufnahme hingewiesen. Ob es tatsächliche Verschiebungen hin zu einem erhöhten KH-Stoffwechsel sowie ob es einen gesteigerten Proteinumsatz im mittleren Lagen (1600-2400m) gibt, müssen zukünftige Studien klären. Mehrere Studien beschreiben bereits jetzt eine Herunterregulierung der Proteinsynthese und einen erhöhten Proteinbedarf sowie Veränderungen im Energie-, KH- und Flüssigkeitsumsatz in hohen bis extremen Höhenlagen. (Stellingwerff et al.; 2019) Bezogen auf mittlere Höhen führen Katayama et al. (2010) in einer älteren Arbeit aus, dass die Stressreaktion auf Bewegung verstärkt ausfällt und daher ist der KH-Bedarf höher, als auf Meereshöhe (Katayama et al., 2010). In dem Zusammenhang ist der Gewichtsverlust ein häufiges Phänomen in der Höhe, da es durch die Hypoxie zu einer Appetitunterdrückung in Kombination mit einem Anstieg des Grundumsatzes kommt. Ein hoher Gesamttrainingsumfang sorgt weiterhin für einen gesteigerten Leistungsumsatz.

Um einen praxisorientierten Bezug zu den unterschiedlichen energetischen Anforderungen auf den Wettkampfdistanzen im Skilanglauf herzustellen, kann die Abbildung von Rusko (2003) verwendet werden.

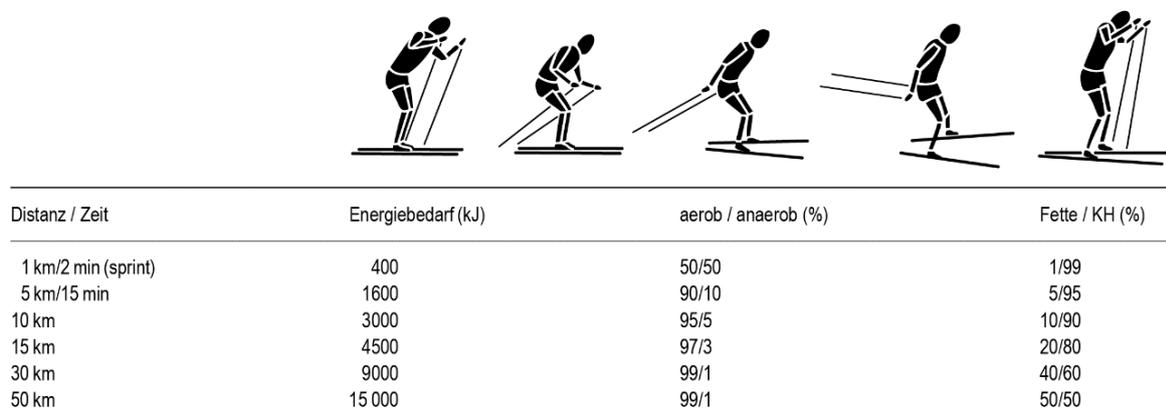


Abb. 23. Energiebedarf und Beitrag zur Energieabgabe aus aeroben und anaeroben Prozessen und der Verwertung von Fetten und Kohlenhydraten (KH) während Skirennen (modifiziert nach: Rusko, 2003)

Flüssigkeitsbedarf: Neben dem Energiebedarf ist auch der Flüssigkeitsbedarf in der Höhe erhöht. Aus diesem Grund sollten die Athleten ermutigt werden, während des Aufenthalts in der Höhe auf eine gesteigerte Flüssigkeitsaufnahme von täglich 3-5l zu achten (Burtscher et al. 2018).

Eisenhaushalt: Neben der Empfehlung zur Erhöhung der Eisenzufuhr über die tägliche Nahrungsaufnahme, wird in der aktuellen Fachliteratur eine Empfehlung zur oralen Eisen-substitution gegeben. Ca. 4-6 Wochen vor dem HT sollte eine Laboranalytik stattfinden, 2 bis 3 Wochen vor Beginn kann mit einer oralen Supplementierung begonnen werden und während der gesamten Zeit des HT fortgesetzt werden. Die endgültige Entscheidung sollte jedoch bei dem verantwortlichen Sportmediziner liegen (Stellingwerff et al., 2019).

Antioxidantien: Derzeit scheint es am sinnvollsten zu sein, während des HT, reichlich anti-oxidativ-wirkende Lebensmittel über die tägliche Ernährung zu integrieren. Insgesamt gibt es keine ausreichenden Beweise zur Supplementierung von einzelnen Antioxidantien um den höhenbedingten oxidativen Stress abzuschwächen, insbesondere nicht in niedrigen und mittleren Höhenlagen (Stellingwerff et al., 2019).

Weitere Mikronährstoffe: Eine Vitamin C-Quelle (z. B. Orangensaft, niedrig dosiertes Vitamin-C-Supplement) optimiert die Eisenaufnahme. Ebenso gibt es Hinweise darauf, dass tägliche Dosen von >200 mg Vitamin C den Sportler vor einer Erkältung schützen können. Trotz erhöhter UVB-Strahlung aber langer Bekleidung kann eine Vitamin D-Supplementierung in Betracht gezogen werden, da Vitamin D den Eisenstoffwechsel und damit die Erythropoese beeinflussen kann. Neuere Daten belegen, dass ein optimal zirkulierender Vitamin D Spiegel vorbeugend gegen Infektionen der oberen Atemwege wirkt und zur Stärkung der mukosalen Immunität (Schleimhaut-Immunität) beiträgt (Stellingwerff et al., 2019).

Tab. 4: *Ernährungsstrategien zur Optimierung der Vorbereitung auf Ausdauerwettkämpfe in der Höhe (Burtscher et al., 2018)*

Ernährungsstrategien zur Optimierung der Vorbereitung auf Ausdauerwettkämpfe in der Höhe

- 1** Erhöhen Sie die Eisenzufuhr (Fleisch, Fisch) mit dem Zusatz von Hülsenfrüchten und grünem Gemüse. Berücksichtigen Sie Träger-Substanzen / Verstärker (Vitamin C) und verhindern Sie hemmende Stoffe (Kaffee, schwarzer Tee, Kalzium) der Eisenaufnahme.
- 2** Stellen Sie eine ausgewogene Energiebilanz sicher. Kohlenhydratreiche sowie nährstoffreiche Zwischenmahlzeiten sind eine gute zusätzliche Energieversorgung zwischen den regulären Mahlzeiten, insbesondere für diejenigen Sportler, die einen unterdrückten Appetit haben.
- 3** Erhöhen Sie die tägliche KH-Zufuhr auf 10-12 g KH / kg Körpermasse. Zusätzlich werden 60 g bis 90 g KH pro Stunde intensiver Belastung als Glukose- Fruktose-Getränk im Verhältnis 2:1 empfohlen. Beginnen Sie einige der Trainingseinheiten mit suboptimal gefüllten KH-Speichern ("train-low").
- 4** Erhöhen Sie während der frühen Phase der Akklimation die Flüssigkeitszufuhr auf 3 bis 5 Liter, um eine ausreichende Aufnahme zu gewährleisten. Verwenden Sie Sportgetränke anstelle von Wasser. Das Trinken von Tee kann die Stimmung bei Teetrinkern verbessern.
- 5** Nehmen Sie nach dem Training 20-25g hochwertiges Protein zu sich, um die Muskelproteinsynthese maximal zu stimulieren. Proteinpräparate die reich an der Aminosäure Leucin sind, können den Muskelschwund in der Höhe reduzieren.
- 6** Kleine Dosen (1g) an tryptophanhaltigen Lebensmitteln wie z.B. Nüsse (Cashews, Walnüsse, Erdnüsse, Mandeln), Sesam und Kürbiskerne, Sojabohnen sowie Getreide können sowohl die Stimmung als auch die Schlafqualität verbessern.
- 7** Eine ausreichende Zufuhr von antioxidantien-reichen Lebensmitteln sollte gegenüber Nahrungsergänzungsmitteln bevorzugt werden. Es gibt klare Hinweise darauf, dass tägliche Dosen von mehr als 200 mg Vitamin C vorbeugend bei Erkältungen wirken können.
- 8** Die Einnahme von Probiotika mindestens 14 Tage vor einem Höhenttraining oder einem Wettkampf mit einer täglichen Dosis von $\sim 10^{10}$ lebenden Bakterien kann das Risiko von Atemwegs- und Magen-Darm-Erkrankungen reduzieren.
- 9** Nehmen Sie in den Herbst- und Wintermonaten eine Vitamin-D3-Ergänzung von 1000 IE/Tag zu sich. In höheren Lagen sollte die Zufuhr auf 4000 IE/Tag erhöht werden. Einige Lebensmittel wie öliger Fisch (z. B. Thunfisch, Makrele, Lachs) und Shiitake-Pilze sind eine gute Quelle für Vitamin D3.

5 Schlussfolgerung – Konzepte und Empfehlungen

Hat man ein funktionierendes Höhenkonzept erstellt und kann die Effekte und den Nutzen im Jahresverlauf auf die Leistungsentwicklung des Sportlers erkennen und nachweisen, so bieten derartige Trainingsformen durchaus Potential, um zukünftig neue Trainingsreize zu setzen.

Im Vergleich zwischen Athleten deren erster Höhengaufenthalt bevorsteht gegenüber bereits höhenerfahrenen Athleten, werden unterschiedliche Herangehensweisen empfohlen.

Athleten mit wenig Erfahrung im Höhenttraining, wird zu Beginn ein Training in geringen Höhen empfohlen wie z.B. 1000 - 1200m mit abgestufter Aufenthaltsdauer.

Wenn der Hauptwettkampf der Saison in einer Höhenlage stattfindet, gilt die Empfehlung, die Akklimatisation auf der gleichen Höhenlage des Wettkampfes durchzuführen. Weiterhin wird auf Grundlage der Fachliteratur zu drei Höhenttrainingslagern während der gesamten Saison geraten.

Vorherige Höhenttrainingslager sind notwendig um den Körper die Möglichkeit zu geben, sich an die verändernden Sauerstoffpartialdrücke anzupassen.

Unter Höhenbedingungen sind die Pausenzeiten zwischen den Trainingseinheiten in Abhängigkeit von der Höhe, der Belastungsintensität, des Belastungsumfangs und dem individuellen physischen Leistungsniveau zu verlängern (vgl. Tab. 1).

Das subjektive Befinden wird zum wichtigsten Parameter der Trainingssteuerung, er muss in der Höhe aber zunächst „angelernt“ werden.

Da es aufgrund der individuellen Reaktionen des Athleten nicht möglich ist die Wirkung eines Höhenttrainings vorauszusagen, ist ein sorgfältiges physiologisches und leistungsbezogenes Monitoring während der Maßnahme unbedingt notwendig. Dieses Vorgehen hilft dem Athleten, die potenziellen Einschränkungen und die Vorteile des Höhenttrainings besser einschätzen zu können (Robach & Lundby, 2020).

Damit relevante hämatologische Effekte, mit der dafür benötigten gesteigerten körpereigenen EPO-Produktion ausgelöst werden, sind Höhenlagen von mindestens 1800m und höher, mit Aufenthaltsdauern mindesten 400h, bzw. von 21 Tagen oder länger, unter Anwendung des LH-TH oder des LH-TL Konzepts zu empfehlen (Jacobs et al., 2012; Garvican-Lewis et al., 2015; Ploszczyca et al., 2018).

Für das klassische Höhenttraining (LH-TH) werden für Eliteathleten, Höhenlagen von 1800 bis 2500m als optimal angesehen (Saunders et al., 2009).

Wesentlich für eine erfolgreiche Durchführung von LH-TL werden die organisatorische Vorgehensweise bzw. die infrastrukturellen Möglichkeiten vor Ort sein, die das Absolvieren der jeweiligen extensiven oder intensiven Einheiten möglich machen (z.B. Reisewege zu Train-Low – Intervall-Einheiten) und um gleichzeitig ausreichend Zeit für das Live-High sicher zu stellen.

Mit Blick auf die derzeit veröffentlichte Fachliteratur, lässt sich resümieren, dass es eine wachsende Zahl von LL-TH Höhentrainingsmethoden gibt, die die Anwendung systemischer und lokaler Hypoxie-Reize oder eine Kombination aus beidem zur Leistungsverbesserung beinhalten (Girard et al., 2020).

Insofern es aus logistischen und finanziellen Möglichkeiten realisierbar ist, wird generell zur Kombination von unterschiedlichen Hypoxiemethoden geraten, um die sportliche Leistungsfähigkeit günstig zu beeinflussen. Dabei können die Schwerpunkte / Ziele vielseitig ausgerichtet sein und z.B. auf hämatologischer, kardio-pulmonaler oder Muskel-Zell Ebene liegen.

Bei den Olympischen Winterspielen in Beijing 2022 befinden sich die Wettkampfstätten der nordischen Wettbewerbe auf ca. 1700m ü. M. Unter diesen Voraussetzungen müssen die Anpassungsvorgänge des Körpers, Höhenadaptation (akut) und Höhenakklimatisation (chronisch), sowie der Einfluss der Zeitumstellung unbedingt beachtet werden.

6 Literaturverzeichnis

Bahen P, Bunc V, Tlustý P, Grosicki GJ. (2020) Effect of an Eleven-Day Altitude Training Program on Aerobic and Anaerobic Performance in Adolescent Runners, *Medicina (Kau-nas)*. 2020 Apr; 56(4): 184.

Bärtsch P, Dehnert C, Friedmann-Bette B, Tadibi V.(2008) Intermittent hypoxia at rest for improvement of athletic performance. *Scand J Med Sci Sports*. 2008 Aug;18 Suppl 1:50-6.

Bärtsch P, Gibbs J.S.R. (2007) Effect of Altitude on the Heart and the Lungs. *Circulation*, 116 (19) 2191-2202

Bärtsch P, Saltin B. (2008) General introduction to altitude adaptation and mountain sick-ness. *Scand J Med Sci Sports*. 2008;18 (Suppl 1):1–10.)

Bassett DR Jr, Kyle CR, Passfield L, Broker JP, Burke ER (1999) Comparing cycling world hour records, 1967-1996: modeling with empirical data. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1999 Nov; 31(11):1665-1676.

Beard J, Tobin B. (2000) Iron status and exercise. *Am J Clin Nutr*. 2000 Aug;72(2 Suppl):594S-7S.

Berghold F, Brugger H, Burtscher M, Domej W, Durrer B, Fischer R, Paal P, Schaffert W, Schobersberger W, Sumann G (Hrsg.) (2019) *Alpin- und Höhenmedizin*, 2. Auflage, Springer-Verlag; Berlin 2019

Bonetti DL, Hopkins WG. (2009) Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: a meta-analysis. *Sports Med.*; 39: 107-127.

Böning D. (2019) Physical exercise at altitude – acclimation and adaptation effects in highlanders on different continents. *Dtsch Z Sportmed*. 2019; 70: 135-140.

Buhl H. (o.J.) Neuere Erkenntnisse zur Hypoxie. Kurzgefasste Übersicht zur Wirkung von Sauerstoffmangel auf ausgewählte Strukturen des menschlichen Organismus. Manuskriptdruck, ohne Jahr

Burtscher M, Niedermeier M, Burtscher J, Pesta D, Suchy J and Strasser B (2018) Preparation for Endurance Competitions at Altitude: Physiological, Psychological, Dietary and Coaching Aspects. A Narrative Review. *Front. Physiol*. 9:1504.

Chapman, RF., Karlsen, T., Ge, R. L., Stray-Gundersen, J., Levine, BD (2016). Living altitude influences endurance exercise performance change over time at altitude. *J. Appl. Physiol*. 120, 1151–1158.

Chapman RF, Laymon Stickford AS, Lundby C, Levine BD. (2014) Timing of return from altitude training for optimal sea level performance. *J Appl Physiol* (1985). 2014 Apr 1;116 (7):837-43.

Chapman RF, Stray-Gundersen J, Levine BD. (1998) Individual variation in response to altitude training. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md :1985); 85: 1448 -1456

- Diebel SR, Newhouse I, Thompson DS, Johnson VBK. (2017) The Effects of a 10-day Altitude Training Camp at 1828 Meters on Varsity Cross-Country Runners. *Int J Exerc Sci.* 2017;10(1):97-107.
- Faiss R, Léger B, Vesin J-M, Fournier P-E, Eggel Y, Dériaz O, et al. (2013) Significant Molecular and Systemic Adaptations after Repeated Sprint Training in Hypoxia. *PLoS ONE* 8(2): e56522.
- Faiss R, Willis S, Born D-P et al. (2015) Repeated double-poling sprint training in hypoxia by competitive cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc* 2015; 47: 809 – 817
- Foss JL, Constantini K, Mickleborough TD, Chapman RF. (2017) Short-term arrival strategies for endurance exercise performance at moderate altitude. *J Appl Physiol* (1985). 2017 Nov 1;123(5):1258-1265.
- Foster C, Daines E, Hector L, et al. (1996) Athletic performance in relation to training load. *Wis Med J*; 95 (6): 370-4
- Foster C, Florhaug JA, Franklin J, Gottschall L, Hrovatin LA, Parker S, Doleshal P, Dodge C. (2001) A new approach to monitoring exercise training. *J Strength Cond Res.* 2001 Feb;15(1):109-15.
- Foster C, Hector LL, Welsh R, Schragger M, Green MA, Snyder AC.(1995) Effects of specific versus cross-training on running performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1995;70(4):367-72.
- Friedmann, B. (2000) Entwicklungen im Höhenttraining: Trends und Fragen, Jahrgang 51, Nr. 12
- Friedmann, B. & Bärtsch, P. (1999) Möglichkeiten und Grenzen des Höhenttrainings im Ausdauersport. *Leistungssport*, 29, (3) 43-48.
- Friedmann-Bette B. (2008); Classical altitude training; *Scand J Med Sci Sports*: 18 (Suppl. 1): 11–20
- Girard O, Brocherie F, Goods PSR & Millet GP (2020) An Updated Panorama of “Living Low-Training High” Altitude / Hypoxic Methods. *Front. Sports Act. Living* 2:26
- Girard O, Brocherie F, Millet GP (2017), Effects of Altitude/Hypoxia on Single- and Multiple-Sprint Performance: A Comprehensive Review, *Sports Med* 2017
- Gore CJ, Clark SA, Saunders PU. (2007) Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure. *Med Sci Sports Exerc* 2007;39(9):1600-9.
- Halsen SL (2014) Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Med.* 2014 Nov;44 Suppl 2(Suppl 2):S139-47.
- Heincke K, Prommer N, Cajiga J, Viola T, Behn C, Schmitdt W. (2003) Long-term exposure to intermittent hypoxia results in increased hemoglobin mass, reduced plasma volume, and elevated plasma levels in man. *Eur J Appl Physiol*, 2003, 88(6):535–555

- Heinicke K., Wolfarth B., Winchenbach P., Biermann B., Schmid A., Huber G., Friedmann B., Schmidt W. (2001) Blood volume and hemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *Int. J. Sports Med* 22: 504–512
- Hottenrott K, Urban V. (2011) *Das große Buch vom Skilanglauf*, Meyer & Meyer Verlag Aachen, 2011
- Issurin, V. (2007). Altitude training: An up-to-date approach and implementation in practice. *Sporto mokslas*, 2007, 1=47, pp. S. 12-19.
- Jacobs, RA., Lundby, C., Robach, P., Gassmann M. (2012) Red Blood Cell Volume and the Capacity for Exercise at Moderate to High Altitude. *Sports Med* 2012 42, 643–663
- Katayama K, Goto K, Ishida K, Ogita F. (2010) Substrate utilization during exercise and recovery at moderate altitude. *Metabolism*. 2010 Jul;59(7):959-66.
- Küpper T, Ebel K, Gieseler U. (Hrsg.) (2010) *Moderne Berg- und Höhenmedizin Handbuch für Ausbilder, Bergsteiger, Ärzte*, Gentner Verlag, Stuttgart, 2010
- Kura L. (2021) Nonresponder, Low Responder, Hardgainer - Was tun wenn der Trainingseffekt ausbleibt? *Dtsch Z Sportmed*.2021, 72 (6) D1-D3
- Limmer M, de Marées M, Platen P. (2020) Alterations in acid-base balance and high-intensity exercise performance after short-term and long-term exposure to acute normobaric hypoxic conditions. *Scientific Reports*. 2020 Aug;10 (1):13732.
- Levine BD, Stray-Gundersen J. (1997) "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 1997; 83: 102 – 112
- Luks, A.M., Ainslie, P.N., Lawley, J.S., Roach, R.C., & Simonson, T.S. (2021). *Ward, Milledge and West's High Altitude Medicine and Physiology* (6th ed.). CRC Press.
- Lundby C, Montero D, Joyner M. (2017) Biology of VO₂max: Looking under the Physiology Lamp. *Acta Physiol (Oxf)*, 220(2):218-228.
- Maibäurl H. (2000) Höhenakklimatisation, Akklimatization to high altitude, *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 51 (12) 390-395;
- Millet GP, Girard O, Beard A, Brocherie F. (2019) Repeated sprint training in hypoxia – an innovative method. *Dtsch Z Sportmed*. 2019; 70: 115-122.
- Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X, Richalet JP. (2010) Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Med*. 2010 Jan 1;40(1):1-25.
- Mujika, I., Sharma, A.P. & Stellingwerff, T. (2019) Contemporary Periodization of Altitude Training for Elite Endurance Athletes: A Narrative Review. *Sports Med* 49, 1651–1669 (2019).
- Oczenski, W. (2008) *Atmen – Atemhilfen*, ISBN 3-13-137698-5, Georg Thieme Verlag

Płoszczyca K, Langfort J, Czuba M (2018) The Effects of Altitude Training on Erythropoietic Response and Hematological Variables in Adult Athletes: A Narrative Review. *Front. Physiol.* 9:375.

Prommer N, Thoma S, Quecke L, Gutekunst T, Völzke C, Wachsmuth N, Niess AM, Schmidt W. (2010) Total Hemoglobin Mass and Blood Volume of Elite Kenyan Runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2010 Apr;42(4):791-7.

Robach P., Lundby C. (2020) Altitude Training and Endurance Performance. In: Migliorini S. (eds) *Triathlon Medicine*. Springer, Cham. 2020

Robach P, Schmitt L, Brugniaux JV, Nicolet G, Duvallet A, Fouillot JP, Moutereau S, Lasne F, Pialoux V, Olsen NV, Richalet JP. (2006) Living high-training low: effect on erythropoiesis and maximal aerobic performance in elite Nordic skiers. *Eur J Appl Physiol.* 2006 Aug;97(6):695-705.

Rodríguez FA, Àvila S. (2018) Altitude training for sea level performance: a systematic review. *Sport science: Current and future trends for performance optimization*, 12/2018

Rost, R. (Hrsg) (2001). *Lehrbuch der Sportmedizin*. Dt. Ärzte-Verlag, Köln, 2001

Rusko, H. (Ed.). (2003). *Handbook of Sports Medicine and Science - Cross Country Skiing*. Blackwell Science Ltd - Blackwell Publishing Company.

Rusko HK, Tikkanen HO, Peltonen JE. Altitude and endurance training. *Journal of Sports Sciences* 2004; 22: 928-44; discussion 945

Saunders PU, Garvican-Lewis LA, Chapman RF, Périard JD. (2019) Special Environments: Altitude and Heat. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2019 Mar 1;29(2):210-219.

Schmidt W. (2002) Effects of intermittent exposure to high altitude on blood volume and erythropoietic activity. *High Alt Med Biol* 2002, 3:167–176

Schmidt W, Prommer N. (2008) Effects of various training modalities on blood volume. *Scand J Med Sci Sports.* 2008 Aug;18 Suppl 1:57-69)

Schuler, B., Thomsen, J. J., Gassmann, M., Lundby, C. (2007). Timing the arrival at 2340 m altitude for aerobic performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 2007; 17, 588–594.

Sharma AP, Saunders PU, Garvican-Lewis LA, Périard JD, Clark B, Gore CJ, et al. (2018) Training periodisation during live high train high at 2100 m improves sea-level performance in elite runners. *J Sports Sci Med.*; 2018;17(4):607–16.

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, Eltzhig HK, Blackburn M, Roach RC, Xia Y. (2017) Erythrocytes retain hypoxic adenosine response for faster acclimatization upon re-ascent. *Nat Commun.* 2017 Feb 7;8:14108.

Sperlich B, Achtzehn S, de Marées M, von Papen H, Mester J. (2016) Load management in elite German distance runners during 3-weeks of high-altitude training. *Physiol Rep.* 2016 Jun;4 (12):e12845.

Stellingwerff T, Peeling P, Garvican-Lewis LA, Hall R, Koivisto AE, Heikura IA, Burke LM. (2019) Nutrition and Altitude: Strategies to Enhance Adaptation, Improve Performance and Maintain Health: A Narrative Review. *Sports Med.* 2019 Dec;49 (Suppl 2):169-184.

Stray-Gundersen J, Levine BD, Bertocci LA. (1999) Effect of altitude training on runner's skeletal muscle. *Med Sci Sports Exerc* 1999;31(5):S182

Thews G, Mutscher E, Vaupel P. (2007) *Anatomie, Physiologie und Pathophysiologie des Menschen*, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, gebundene Ausgabe, 6. Auflage, 2007

Tomastis J, Haber P. (2016) *Leistungsphysiologie - Lehrbuch für Sport- und Physiotherapeuten und Trainer*, 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2016

Vargas-Pinilla OC. (2014) Exercise and Training at Altitudes: Physiological Effects and Protocols. *Rev Cienc Salud*;12(1):111-126.

Villiger B, Wehrlin J, Vogt M, Angermann M, Birrer D, C M, Perret C, Schlegel C. (2005) *Ein Höhentrainingshandbuch für die Praxis*, Swiss Olympic Association, 2005

Vogt, M., Flück, M., Hoppeler, H. (2004) "Living low - Training high": Eine effektive Höhentrainingsmethode zur Verbesserung der sportlichen Leistungsfähigkeit von trainierten Athleten, Bern Swiss Olympic Association 2004)

Vogt M & Hoppler H. (2005) *Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie»* 53 (2), 76–81

Wehrlin J. (2005) Live high – train low: Ein erfolgreiches Höhentrainingsparadigma zur Leistungssteigerung bei Eliteausdauerathleten? *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*; 53

Wehrlin JP, Hallen J. (2006a) Linear decrease in VO₂max and performance with increasing altitude in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol.*;96(4):404–12.

Wehrlin, J. P., Marti, B., Hallen, J. (2016) Hemoglobin mass and aerobic performance at moderate altitude in elite athletes. *Adv. Exp. Med. Biol.* 903, 357–74.

Wehrlin JP, Zuest P, Hallen J, Marti B. (2006b) Live high-train low for 24 days increases hemoglobin mass and red cell volume in elite endurance athletes. *J Appl Physiol.* 2006;100(6):1938–1945.

Wilber RL. (2004) *Altitude Training and Athletic Performance*, Campaign, IL: Human Kinetics, 2004

Wohnisch M, Hofmann P, Förster H, Hörtnagel H, Ledl-Kurdowski E, Pokan R, (Hrsg) (2017) *Kompodium der Sportmedizin*, 2. Auflage, Springer Verlag GmbH, 2017