

# Höhentraining

<b>1. HÖHENTRAINING</b>	<b>3</b>
1.1 Physikalisch Veränderungen in der Höhe	3
1.2 Erwartungen an ein Höhentraining	3
<b>2 PHYSIOLOGISCHE ANPASSUNGEN</b>	<b>4</b>
2.1 Negative Einflüsse von Höhentraining	6
2.2 Höhererträglichkeit	6
2.3 Auswirkungen für den Athleten	7
<b>3 VORAUSSETZUNGEN FÜR EIN HÖHENTRAININGSLAGER</b>	<b>7</b>
3.1 Organische und individuelle Voraussetzungen	7
3.2 Organisatorische Voraussetzungen	8
<b>4 HÖHENTRAININGSFORMEN</b>	<b>8</b>
4.1 Hypoxieformen	8
4.2 Möglichkeiten der Kombination von künstlichen und natürlichen Höhentraining	8
4.3 Training in verschiedenen Höhen	9
4.4 Länge eines Höhentrainingslagers	9
<b>5 SPEZIELLE STRUKTUREN DES TRAININGSAUFBAUS IN DER HÖHE</b>	<b>9</b>
5.1 Trainingsaufbau	9
<b>6 INHALTE</b>	<b>10</b>
6.1 Schwerpunkte bei Höhentrainingslager als Gipfel eines Mesozyklus	11
6.2 Trainingsaufbau des Höhentrainings für Wettkämpfe in der Höhe	11
<b>7 METHODISCHE PRINZIPIEN ZUR DURCHFÜHRUNG EINES HÖHENTRAININGS</b>	<b>11</b>

<b>8</b>	<b>PERIODISIERUNG DES HÖHENTRAININGS</b>	<b>12</b>
8.1	Einordnung des Höhentrainings in den Jahresverlauf	12
8.2	Höhentrainingslagerkette mit Steigerung der Meereshöhe	13
<b>9</b>	<b>BELASTUNGSSTEUERUNG</b>	<b>13</b>
<b>10</b>	<b>AUSBLICKE</b>	<b>14</b>
<b>11</b>	<b>HISTORISCHER HINTERGRUND (VGL NEUMANN ET AL., 2005)</b>	<b>3</b>
<b>12</b>	<b>TRAININGSWISSENSCHAFTLICH RELEVANTE UNTERSUCHUNGEN</b>	<b>14</b>
12.1	Höhentrainingsmaßnahmen in der japanischen Schwimm-Nationalmannschaft (Wakayoshi, K., 2005)	14
12.2	Höhentraining für Kampfsportarten (LEHMANN/HEINISCH, 2000)	15
12.3	Höhenakklimatisation (Mairbärl, H., 2000)	17
12.3.1	Ventilation/Druckausgleich	17
12.3.2	Sauerstoffbindungskurve	17
12.3.3	Herz, Kreislauf	18

**Lit:**

De Marrés, H. (1996/2004). *Sportphysiologie*. Strauss und Buch: Köln.

Friedmann, B. (2000): Entwicklungen im Höhentraining. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 51 (12), S. 418-234.

Friedmann, B., Brätsch P.(1999): Möglichkeiten und Grenzen des Höhentrainings. *Leistungssport* 29 (3). S. 43-48.

Fuchs, Reiss (1990). *Höhentraining-Trainerbibliothek* 27. Münster: Philippka-Verlag.

Lehmann, G., Heinisch, H. D. (2000). Höhentraining für Kampfsportarten. *Leistungssport* 30 (3), 35-40.

Mairbärl, H. (2000): Höhenakklimatisation. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 51 (12), 390-394.

Neumann, G., Pfützner, A., Berbalk, A. (2005). *Optimiertes Ausdauertraining*. Meyer & Meyer: Aachen.

Reiss, M. (1998). Höhentraining in Ausdauersportarten. *Leistungssport* 4/98, S.21-28.

Shephard, R.J.: Umwelteinflüsse und Umweltbedingungen: Höhe. Dirix, Knuttgen, Tittel (Hrsg.), 1989. Olympia Buch der Sportmedizin . Köln: Deutscher Ärzte Verlag.

Wakayoshi, K. (2005): Höhentrainingsmaßnahmen in der japanischen Schwimm-Nationalmannschaft. *Leistungssport* 35 (5), 32-36.

Weineck, J. (2004). *Optimales Training*. Erlangen: Spitta.

## **1 Historischer Hintergrund (vgl NEUMANN et al., 2005)**

Anlass zum Höhentaining waren die OS in Mexiko City in 2.240m Höhe 1968. Bei Sportarten über 2min Dauer (MZA) konnte ein Leistungsrückgang beobachtet werden. Um dem Vorzubeugen wurde das Höhentaining eingeführt. Man entdeckte das Training in Höhen zwischen 1800m und 3000m für die Leistungsentwicklung in den Ausdauersportarten förderlich war.

In den Sportarten unter 2min konnten vermehrte Weltrekorde bei demselben Os beobachtet werden. Dies ist auf die begünstigte Bewegungsmotorik auf Grund des geringern Luftwiderstandes in der Höhe zurück zu führen.

## **2 Höhentaining**

*Welche physikalischen Veränderungen ergeben sich in der Höhe?*

### **2.1 Physikalisch Veränderungen in der Höhe**

- ↓ Sauerstoffpartialdruck
- ↓ Luftdruck/Luftwiderstand
- ↓ Wasserdampfdruck
- ↓ Luftdichte
- ↓ Umgebungstemperatur
- ↓ verringerte Erdanziehungskraft um  $0,3\text{cm/s}^2$
- ↑ Strahlungsintensität

Der Sauerstoffpartialdruck nimmt ab, jedoch nicht die Volumenkonzentration der Gasteilchen in der Luft (20.93%). Entscheidend ist das der Sauerstoffpartialdruck in den Aveolen auch in 0NN niedriger ist, als die Umgebungsluft. Demnach ist der aveoläre Sauerstoffpartialdruck in der Höhe noch mal erniedrigt, was zu einer verminderten Sauerstoffaufnahme führt.

*„Von hypoxischer Hypoxie wird aus physiologischer Sicht gesprochen, wenn ein verminderter Sauerstoffpartialdruck in der Atemluft, eine verringerte Sauerstoffaufnahme oder –diffusion in der Lunge und ein verminderter arterieller Sauerstoffpartialdruck vorliegt“ (FUCHS/REISS, 1990, 13).*

### **2.2 Erwartungen an ein Höhentaining**

***Was sind die Erwartungen von einem Höhentaining?)***

- Höhere/neue Reize/Wirkung unter gleichen bis red. Trainingsnormativen um 3-10% (vgl. NEUMANN et al., 2005)
- Chancengleichheit gegenüber in der Höhe lebenden und trainierenden Sportler
- Trainingsrückstände sollen schneller ausgeglichen werden
- Potentielle Nachwuchssportler sollen schneller an die Weltspitze ran geführt werden
- Aufgrund des geringeren Luftwiderstands können höhere lokomotorische Geschwindigkeiten realisiert werden. Die Dichte ist bereits bei 1829m um 19,9%, bei

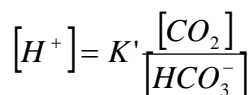
2438m um 25,7% und bei 3048m auf 31,2% verringert. Umso schneller eine Disziplin durchgeführt wird desto mehr Vorteil ergibt sich daraus (SHEPHARD, R.J., 1989).

### 3 Physiologische Anpassungen

#### ***Welche physiologischen Wirkungen ergeben sich durch ein Höhentaining?***

##### Physiologische Reaktionen bei kurzfristigem Aufenthalt in mittleren Höhen:

- *HMV* nimmt zu, zusammengesetzt aus dem SV und der HF. Dabei ist die HF entscheidender Faktor, da das Schlagvolumen sich nur limitiert ausdehnen kann. Es wird mehr Blut durch den Körper transportiert, was den Transport von Sauerstoff begünstigt und somit der Hypoxie entgegen wirkt.
- *Vasodilatation* der Gefäße. Entscheidender Faktor für die Zunahme des *HMV*, da der Strömungswiderstand im Blut abnimmt.
- *AMV* nimmt mit dem sinkenden Sauerstoffpartialdruck zu. Durch verminderte O<sub>2</sub> Aufnahme und verminderten O<sub>2</sub> Druck in den Aveolen versucht der Körper diesen Mangel auszugleichen, durch die Hypoxie kommt es zur Reizung der O<sub>2</sub> Chemorezeptoren im Atemszentrum der Carotis → Hyperventilationseffekt. Begünstigt wird der Hyperventilationseffekt durch den verminderten Atemwiderstand aufgrund des geringen Luftdruckes.
- *Respiratorische Alkalose*. Durch das vermehrte Abatmen des CO<sub>2</sub> kann das Blut mehr O<sup>2</sup> binden. Durch die CO<sub>2</sub>-Reduzierung wird H<sup>+</sup> verringert und das Blut wird alkalisch. Zur Kompensation des pH wird über die Niere Bicarbonat ausgeschieden, dadurch fällt die HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration an und die H<sup>+</sup> Konzentration steigt wieder. (kompensierte respiratorische Alkalose).



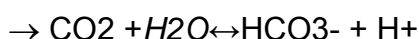
- *Hypoxie im Gewebe*, durch eine Abnahme der Sauerstoffsättigung im Blut. Nach der O<sub>2</sub> Bindungskurve besitzt das Blut durch den Hyperventilationseffekt eine Pufferkapazität für die Sauerstoffsättigung bis in eine Höhe von 4000m. Vorher nimmt O<sub>2</sub> Sättigung nur um ca. 20% ab. Dann aber wird die O<sub>2</sub> Bindungskurve steil was eine verminderte Bindung von O<sub>2</sub> an das Hämoglobin bedeutet.
- *Kapillarisierung (Vergrößerung der Austauschfläsche)*; durch die erhöhte Durchflußrate des Blutes (Vasodilatation & HMV) und die Hypoxie.
- *H<sub>2</sub>O Verlust* über die Schleimhäute, da das Blut auf 100% Luftfeuchtigkeit angereichert werden muss, sonst droht die Austrocknung der Schleimhäute und der Aleolarwand.
- *Verminderung VO<sub>2</sub> Max.* (Produkt aus max. O<sub>2</sub> Sättigung im Blut und Ausschöpfung im Gewebe) durch die Hypoxie im Gewebe (Verminderte O<sub>2</sub>Menge pro Volumeneinheit Luft) und das höhere Laktat.
- *Erhöhung des KH Stoffwechsels* . Da der Körper nur mit ausreichend O<sub>2</sub> oxidativ arbeiten kann ist der Stoffwechsel Richtung Glykolyse verschoben. Es fallen höheren Laktatwerte um 1-2mmol/l an. Bei KH- Defizit kann dies zu einem Proteinkatabolismus führen.

- Hypoxie wird durch erhöhten Laktatanfall von 1-2 m/mol ausgeglichen (vermehrte Glykolyse)- trotz Korrekturen der Geschwindigkeit bleibt Laktatkonzentration erhöht (NEUMANN et al., 2005). Zusätzlich verlängert sich der Laktatabbau, was zu einer Pausenverlängerung bei int. Trainingseinheiten führt (REISS/FUCHS, 1990).
- Vermindertes Maximallaktat, da die verfügbare sportartspezifische Leistungsfähigkeit nicht voll ausgeschöpft wird.

#### Adaptionen bei längerem Aufenthalt in der Höhe (min. 2 Wochen):

- *Erythropoese*: Bildung von Retikulozyten im Rückenmark, angeregt durch das Hormon Erythropoetin, gebildet in der Leber und Niere unter Hypoxie. Zusätzlich steigert Erythropoetin die intraerethrozytären 2,3 DPG Aktivität (Disphosphoglycerat), was zu einer vermehrten Abgabe des Sauerstoffs vom Hämoglobin an das Gewebe führt. Bei gleichzeitiger Zunahme der Hämokonzentration führt dies zur Eindickung des Blutes. In 4000-5000m kann der Hämatokrit bis auf 60-70% steigen.
- *Zunahme des Hämatogrits* (gelöste Teilchen im Blut) durch Vermehrung der Erythrozyten und H<sub>2</sub>O Verlust. **Gefahr bei über 55% durch Gefäßverstopfung/Trombenbildung, erhöhte Herzarbeit (→ sinken des HMV) verschlechterte Diffusion des Blutes und Verschlechterte Durchblutung der Akren mit Erfrierungsgefahr.** Gegenmaßnahmen sind 5-7 Liter trinken und eventuell eine Blutverdünnung, durch Blutaustausch aus der Konserven. Ein optimaler HK in der Höhe liegt bei 50%, gegenüber knapp 40% im Flachland.
- *Schnellere Lösung des Sauerstoffs vom Hämoglobin*. Die Sauerstoffbindungskurve verschiebt sich nach rechts. Durch die Steigerung der Aktivität *des 2,3 DPG und den H<sup>+</sup>-Ionen* kann das HB den Sauerstoff leichter ans Gewebe abgeben.
- *Zunahme des Hämoglobins*. Um die Zunahme des Hämoglobins zu Messen muss das Gesamt-Hb gemessen werden, ansonsten kann nur eine grobe Übersicht ermittelt werden. Zulässige Höchstwerte sind heute 17g/dl bei den Männern und 16g/dl bei den Frauen, ansonsten folgt eine Sperre von 4-7 Tage und Kontrollen auf EPO (NEUMANN et al. 2005). Bei längeren Aufhalten in Höhen von 4000-5000m würden HB Werte von 20g/dl gemessen.
- *Kompensation der respiratorischen Alkalose (nach 24h)*: Ausscheidung von Bikarbonationen, zur Herstellung von H<sup>+</sup> Ionen, wodurch das Blut wieder auf sein normales Niveau zurückkommt. Dabei geht allerdings vermehrt H<sub>2</sub>O verloren

$$[H^+] = K' \frac{[CO_2]}{[HCO_3^-]}$$



- Allerdings verliert das Blut seine Pufferkapazität für die bei anaerober Arbeit anfallenden H<sup>+</sup> Ionen. Diese können nicht ausreichend durch Bikarbonat abgepuffert werden. Das Blut wird saurer → Einschränkung der anaeroben Leistungsfähigkeit!
- Durch die ansteigenden H<sup>+</sup> Ionen der Glykolyse wird wiederum das Atemzentrum gereizt, was das AMV weiter steigen lässt und ca. am 8 Tag sein Maximum erreicht. So ergibt sich ein Kreislauf aus vermehrter CO<sub>2</sub> Abgabe, Bikarbonat Ausscheidung und H<sup>+</sup> Ionen Anhäufung.

- *Verminderung HMV.* Durch die steigende Viskosität des Blutes steigt auch der Widerstand in den Kapillaren und der Effekt der Vasodilatation geht verloren. Das SV nimmt aufgrund eines hohem Hämotogrits und der andauernden hohen HF ab. Der Reiz auf die Systole nimmt mit Adaption an die höhere HF ab. Es wurden niedrigere Werte des HMV als unter normalen Flachlandbedingungen gemessen.
- *Adaption der VO<sub>2</sub> max.* bis auf –6% des Ausgangsniveau aufgrund der Zunahme von Austauschfläche, AMV, HB und Erythrozyten. Vollständige Kapazität der maximalen VO<sub>2</sub>max wird meist erst 3 Wochen nach dem HTL erreicht, es kann dann auch zur Superkompensation der VO<sub>2</sub>max kommen.
- *Myoglobinzunahme:* Muskelfarbstoff in den phasischen ST-Fasern der O<sub>2</sub> auch unter *verminderten O<sub>2</sub> Partialdruck* bindet.
- *Vermehrung der Mitochondrien und der oxidativen Enzyme.* Vorausgesetzt man arbeitet vorwiegend im submaximalen GA1 Bereich, da ein eventuell anfallendes Laktat toxisch auf die Mitochondrien wirkt.
- *Plasmavolumenzunahme,* was die Erhöhung des Hämotogrits ausgleicht (NEUMANN et al. 2005).
- *Adaption der Schleimhäute* auf die trockene Luft (niedriger Wasserdampfdruck), mit vermehrter Durchblutung.  
(vgl WEINECK, 2004, 181-184)

### 3.1 Negative Einflüsse von Höhenttraining

*Welche Schwierigkeiten können sich für den Sportler in der Höhe ergeben?*

- *Proteinkatabolismus,* wenn chronischer Glykogenmangel durch vermehrte Glykolyse.
- *H<sub>2</sub>O Verlust.* Die Luft muss beim Einatmen auf 100% Luftfeuchtigkeit erwärmt werden. Es kann zur Austrocknung der Alveolarwand und der Schleimhäute kommen.
- *Sonnenbrandgefahr* durch verstärkte ultraviolette Strahlung.
- *Zahnschmerzen und Entzündungen der Nasennebenhöhlen* durch Ausdehnung der Hohlräume und Druck auf das Trommelfell, was zur Lösung von Bakterien und bakteriellen Infektionen im Bereich des Mittelohrs führen kann.
- *Höhenkrankheit durch Ausdehnen der Hypoxie auf das Gehirn.* Der Sauerstoffmangel im Gehirn kann von Kopfschmerzen, über Schwindel bis zu euphorischem Verhalten und Bewusstlosigkeit führen (Höhenkrankheit).
- *Zu hoher Hämotogrit (über 50-55%) und Hb über 16-17g/dl,* Sperre für 4-7 Tage bis zu 1 Monat und Kontrollen auf EPO. Gefahr des Gefäßverschlusses.
- Bei Kombinationssportarten hat sich gezeigt, dass ein anstrengendes Höhenttraining zu *Störungen im konzentrativen (mental)en Bereich* kommt.
- *Lungenödem* innerhalb der ersten 9-36 Stunden. Höhenschwelle scheint für Freizeitsportler bei 2500mH zu liegen, bei Leistungssportlern auf Grund des Trainings und Vorerfahrungen mit Ausbleiben des Hyperventilationseffektes ist eventuell schon früher damit zu rechnen.

### 3.2 Höherenträglichkeit

*Welche Höhen kann der Mensch bewältigen?*

Bis 2000m ist die „Indifferente Zone“, es kann zu Veränderungen durch Hypoxie ohne Auswirkungen auf die Leistung kommen.

Bei 2000m ist die „Reaktionsschwelle“, welche die Adaption des Organismus auf die Höhe bedingt. Bis 4000m muss mit *kompensierten Veränderungen* und Leistungseinbußen gerechnet werden. Das Trainingsregimes und die Methodik müssen verändert werden. „Zone der vollständigen Kompensation“

Bei 4000m liegt die „Störungsschwelle“. Ab hier kann der Körper nur noch bedingt Leistung vollbringen, da es zur unvollständigen Kompensation der Höhe kommt („Zone der unvollständigen Kompensation“) Es ist nicht mehr sinnvoll ein HTL durchzuführen, außer man lebt unter Höhenbedingungen.

Bei 7000m liegt die „tödliche Schwelle“, hier kann es schnell zu Lungenembolien und Höhenkrankheiten kommen, wenn nicht vorher *eine Akklimation* auf niederen Höhen stattgefunden hat.

Über 7000m beginnt die „tötliche Zone“. Ohne O<sup>2</sup> ist der Mensch nur bedingt in der Lage zu Verweilen.

### **3.3 Auswirkungen für den Athleten**

#### ***Welche Ergebnisse sind bei Rückkehr ins Flachland zu erwarten?***

Die ausgelösten Anpassungsmechanismen bilden die Grundlage für ein zeitlich begrenztes höheres psycho-physisches Leistungsniveau und eine höhere Belastungsverträglichkeit

- Verschiebung der aeroben/anaeroben Schwelle nach rechts (Ökonomisierung/ Verbesserung der Geschwindigkeit unter aeroben Bedingungen)
- D.b. Ökonomisierung der Stoffwechselprozesse im aerob/anaeroben Übergangsbereich/höhere Geschwindigkeit
- Vergrößerung des Bewegungsvortriebs bei Geschwindigkeiten über 90% des Renntempos
- Subjektiv empfundene höhere Belastungsverträglichkeit
- Steigerung der Kraft/ Grundlagenausdauer
- Verträglichkeit/ Bewältigung wettkampfspezifischer Belastungen/ Ausdauer
- Verbesserung des VO<sup>2</sup>max frühestens nach drei Wochen Transformation
- Besserer Regenerationsverlauf durch die Steigerung der aeroben Kapazität (REISS, 1998)

## **4 Voraussetzungen für ein Höhentrainingslager**

### **4.1 Organische und individuelle Voraussetzungen**

#### ***Welche Voraussetzungen sollte ein Sportler idealerweise mitbringen um von einem Höhentrainingslager zu profitieren?***

- Höhentrainingslager sollte idealerweise auf den im Flachland hoch adaptierten Organismus angewendet werden (Niveau der Grundlagenausdauer über 20h/Woche oder eine VO<sup>2</sup>max von 60ml/kg x min bei den Frauen bei den Männern 65 ml/kg x min vgl. NEUMANN et al., 2005)
- Optimaler Gesundheitszustand (Infektionen insbesondere im Rachen/ Mundbereich sollten nicht vorhanden sein)
- Psycho-physische Frische

- Höhenerfahrungsgrad
  - Bisher absolviertes Training
  - Genügend Regeneration
- (REISS, 1998)

## 4.2 Organisatorische Voraussetzungen

### ***Welche Trainingsbedingungen sind für den Sportler wichtig?***

- Sportartspezifische & semisportartspezifische Trainingsgestaltung muß möglich sein
  - Spitzenverbände müssen ihren Sportlern die vor und nach Untersuchung mit Leistungsdiagnostik, gezielte Trainingssteuerung, wis. Trainingsbegleitung, Kontrollen zur Beurteilung der Trainingswirkung und Regenerationsdynamik gewährleisten
  - Stärkere Individualität für optimale trainingsmethodische Gestaltung → nicht das einfache replizieren vorheriger Trainingsprinzipien
- (REISS, 1998)

## 5 Höhentrainingsformen

### 5.1 Hypoxieformen

#### ***Welche Hypoxieformen gibt es?***

- Training unter natürlichen hypoxischen Bedingungen bei Höhen zwischen 1800- 3500m (*Mittelgebirge/natürliche Luftdruckred.*)
  - Unterdruckkammern (*künstliche Luftdruckred.*)
  - Training in einem abgeschlossenen Raum mit hypoxischem Gasgemisch (*künstliche Volumenreduzierung des O<sub>2</sub> mittels Zuführung von Stickstoff und Elimination von übermäßigen CO<sub>2</sub>*)
  - Training mit Masken (*künstliche Volumenred. O<sub>2</sub> durch Totraummasken oder Rückatmung von CO<sub>2</sub>*) tragbar o. Stationär
  - Einleiten von Stickstoff in die Raumluft = Sauerstoffmangel im Gewebe (NEUMANN et al., 2005)
- (REISS, 1998)

### 5.2 Möglichkeiten der Kombination von künstlichen und natürlichen Höhenttraining

#### ***Welche Möglichkeiten gibt es künstliches und natürliches Höhenttraining zu kombinieren?***

Folgende Varianten von Höhenttrainingsformen und künstlichen Hypoxiebedingungen können eingesetzt werden:

- a) Training und Aufenthalt unter hypoxischen Bedingungen (natürliche Höhenlagen: 1800-3500m)
- b) Training und Aufenthalt unter Höhenbedingungen (n.H.) kombiniert mit Training im Flachland (unter 1000m)
- c) Training unter Hypoxie (k.H.) kombiniert mit Training und Aufenthalt im Flachland
- d) Training unter Hypoxie (k.H./n.H.) kombiniert mit Wohnen und Schlafen im Flachland
- e) Aufenthalt/ Schlafen in Höhe (über 2200m) kombiniert mit Training in niedrigen Höhen 800-1500mH.

## **Für den hochadaptierten Organismus erweist sich die Methode e) als nicht reizwirksam.**

Training in k.H. kann genutzt werden um eine Voranpassung für ein bevorstehendes Höhentrainingslager zu schaffen. Infekte und Übertraining kann so vermieden werden.

(REISS, 1998)

Training mit Masken wird teilweise täglich 60min in Ruhe angewendet um eine milde Aktivierung der Blutbildung zu erreichen (NEUMANN et al., 2005).

### **5.3 Training in verschiedenen Höhen**

#### ***In welchen Höhen sollte ein Höhentrainingslager stattfinden?***

- Mindesthöhen von 1800- 2500m Höhe für Langzeitausdauerdisziplinen bis zu 3500m und darüber
  - Ideale Lage ist 1700-3200mH (NEUMANN et al., 2005)
- Höhentrainingslagerer können schon ab 1000m profitieren (REISS, 1998)
  - Ab 750m (NEUMANN et al., 2005)
  - Das Schlafen kann auch in Höhen von 600-1000mH verlegt werden, um dem Organismus eine bessere Regeneration zu bieten
- Höhentrainingslagerketten über mehrere Wochen innerhalb eines Trainingsjahr mit steigender Höhe (REISS, 1998)
- Ab 4000m befindet sich die Sauerstoffbindungskurve im steilen Bereich, so dass zwar die Abgabe des O<sup>2</sup> an das Gewebe begünstigt wird, jedoch aber weniger Sauerstoff durch den sinkenden Partialdruck gebunden werden kann. Hier ist ein HTL nicht mehr sinnvoll.
- Für Sportarten bei denen es darum geht die Schnelligkeit aufrecht zu erhalten, sollten Höhen bis zu 1500-2300m gewählt werden um nicht die Bewegungsgeschwindigkeit verringern zu müssen ohne das Risiko von Überlastungen einzugehen (Wakayoshi, 2005).

### **5.4 Länge eines Höhentrainingslagers**

#### ***Wie lange sollte ein Höhentrainingslager sein?***

- Bei 3-4 Wochen 80% der physiologischen Anpassungen
- Höhere Anpassungsmechanismen erst nach 5-6 Wochen
- 100 Trainingstage unter hypoxischen Bedingungen/ Jahr (31/2 Monate= 3x a`4-5 Wochen)
- Das Trainingslager in der UWV sollte idealerweise 7 Wochen vor einem Hauptwettkampf im Flachland statt finden:  
= 3 HAT 1. Woche Aklima.- GA1-KA; 2-3 Woche Umfangsteigerung; Rekom-WSA-GA2; 4 Woche Transformation Heimreise- REKOM; 5-6 Betonung des WSA mit Kompensation; 7 Woche Wettkämpfe

## **6 Spezielle Strukturen des Trainingsaufbaus in der Höhe**

### **6.1 Trainingsaufbau**

***Wie ist der Trainingsaufbau eines Höhentrainingslagers zur Steigerung der Leistung im Flachland?***

- Vorbereitungsphase 4-6 Tage vor dem Trainingslager: nur aerobes Training um die Höhenanpassung nicht zu gefährden (Gesundheitsüberprüfung und Kontrolle des aeroben Ausdauerlevels evtl. KLD)
- Akklimation 4-6 Tage ( zu Beginn des Trainingslagers: extensive aerobe Grundlagenausdauer semispezifisch und spezifisch, sowie schnelligkeitsmotorische Anforderungen alaktazid; 50% kraftbetont, da es wegen der Geschwindigkeitsreduktion zur Verringerung der Kraftausdauer in der spezifischen Muskulatur kommt (Kraftausdauertraining).
- Hauptbelastungsphase bis zum Ende des Trainingslagers, dabei sollten zwei Belastungsspitzen von je 8-10 Tagen gesetzt werden mit jeweils 2-3 Entlastungstagen→ vorwiegend aerobes Training. (Aerobe/anaerobe Grundlagenausdauer in Kombination mit Schnelligkeitsausdauer, abschließend ein zweitägiger aerober Trainingsblock)  
z.B. (3:1;3:1;2:1) -1- (2:1;3:1;3:1)
- Reakklimatisation 5-10 Tage (Herstellung des optimalen psycho-physischen Leistungszustand) aerobes Training, Training an der aeroben/ anaeroben Schwelle, sowie Schnelligkeitsausdauer und Schnelligkeitstraining in mittleren Umfängen.
- Ausnutzungsphase des erworbenen Potenzials für Wettkämpfe ab dem 10. Tag nach Rückkehr ins Flachland  
KLD frühestens nach dem 10 Tag der Rückkehr ins Flachland  
(REISS, 1998)
  - Höchstleistung eventuell 1-3 Tage nach Rückkehr (bei KZA & MZA) durch die verbleibende Pufferkapazität, sodass die Glykolyse leichter fällt; außerdem sollte die Nachbereitung in der Höhe größer ausfallen
    - Ansonsten 14-17 Tag nach dem Höhenttraining
  - Instabilität am ehesten 4-10 Tag
  - Wird ein sehr hoher Umfang absolviert, kann die Transformation bis zu 3 Wochen dauern (individuelle Leistungsvoraussetzungen müssen stärker als in Flachland beachtet werden.  
(NEUMANN et al. 2005)

## 7 Inhalte

### ***Welche Inhalte sollten in einem Höhentrainingslager beachtet werden?***

- 1-3 Tage Regeneration ohne intensive Belastungen vor der Abreise in die Höhe
- Der erste Teil (1 Woche) des Höhentrainingslagers im Grundlagenausdauerbereich (und Übergangsbereich) (80-90% der VO<sup>2</sup>max) mit mindestens 50% Kraftausdauertraining (Zusatzlasten, erhöhten Widerständen, Berganstrecken. Akzentuiert sollte alaktazides Schnelligkeitstraining eingebracht werden, um die Motorik zu Schulen.
- Im zweiten Teil (2-3 Woche) des Höhentrainingslagers wird Steigerung der Grundlagenausdauer (2 Woche) mit Schwellentraining und laktatzen Schnelligkeitsausdauertraining kombiniert (3 Woche).

- Das Höhentrainingslager sollte mindestens mit einem zweitägigen (ideale 1 Woche) aeroben Trainingsblock abgeschlossen.
- Die Reakklimation (min 1-2 Wochen) sollte von Grundlagenausdauer kombiniert mit Training an der anaeroben Schwelle, sowie Schnelligkeit geprägt sein. Vereinzelt kann auch Schnelligkeitsausdauer eingesetzt werden. Allerdings sollten hohe Laktatzide Einheiten vermieden werden.

(REISS, 1998)

### 7.1 Schwerpunkte bei Höhentrainingslager als Gipfel eines Mesozyklus

**Welche Schwerpunkte sollte man in einem Höhentrainingslager am Ende eines Mesozyklus setzen?**

- Potentielle Schwerpunkte eines Höhentrainingslagers am Ende eines Mesozyklus (6-8 Wochen) :
- allgemeine Konditionierung auch mit allgemeinen & semispezifischen Trainingsmitteln
- Grundlagenausdauer-Kraftausdauer-Schnelligkeit (besonders für Kurz und Mittelzeitausdauerdisziplinen)
- Aerob/anaerobes Übergangstraining und Schnelligkeitsausdauertraining (für Kurz und Mittelzeitausdauerdisziplinen)
- Grundlagenausdauer und Wettkampfausdauertraining (für Langzeitausdauerdisziplinen)
- Erster Teil der UWV mit wettkampfnahen Belastungsformen und Grundlagentraining zur Kompensation (bei KZA-MZA ca. 6 Wochen vor dem HWK um motorische Vorteile in der Höhe auszunutzen; bei LZA bis zu 10 Wochen vor dem HWK, da Ausprägung der Stoffwechselfvorgänge länger brauchen).

(REISS, 1998)

### 7.2 Trainingsaufbau des Höhentrainings für Wettkämpfe in der Höhe

**Wie sieht die Vorbereitung für einen Wettkampf in der Höhe aus?**

- 2-3 Wochen vor dem Wettkampf sollte der Sportler schon über ein komplexes Ausgangsniveau im Flachland verfügen
- diesem komplexe hohem Ausgangsniveau sollten Höhenketten voraus gehen
- 2-4 wöchiges Höhentrainingslager direkt vor dem Wettkampf
- hierzu gehören die Akklimation 4-6 Tage, 8-10 Tage Aktivierung und Stabilisierung bis zu Wettkampfausdauer auf kurzen Strecken (keine hohen Laktaziden Belastungen), 4-6 Tage Herstellung der psycho-physischen Frische mit einzelnen Wettkampfausdauer-Belastungen zur Aktivieren und GA- Training

(REISS, 1998)

## 8 Methodische Prinzipien zur Durchführung eines Höhentrainings

**Auf welche methodischen Inhalte des Trainings muss in der Höhe, im Vergleich zum Flachland Rücksicht genommen werden?**

- Akzentuierte Trainingsschwerpunkte für jedes Trainingslager

- Überschneidung von aeroben Schwerpunkten und laktaziden Belastungen sollten vermieden werden.
- Vorwiegend aerob- in geringerer Geschwindigkeit ca. 0,2-0,4m/s
- Um die Belastbarkeit zu sichern wird im Übergangsbereich (GA2) und WSA die Laufgeschwindigkeit um 0,2-0,3 m/s vermindert (vgl. NEUMANN et al. 2005)
- Pausendauer verlängern um ca. 1/4-1/3
- Anaerob-laktazide Einheiten sollten mit Laktatkontrolle, geplant und äußerst dosiert eingesetzt werden (verringerte Regeneration, höhere Laktatakkumulation)
- Für Schnelligkeits-, Wettkampf-, Langzeitausdauerdisziplinen bis 30 min. sollte das Training in Unterdistanzen und schneller (über 100%) als Renntempo durchgeführt werden, um Motorik und Tempogefühl zu schulen (kontrovers zu NEUMANN et al. 2005)
- Dagegen bei Disziplinen über 30 min. Training in über 90 % des Renntempos, schon ab der zweiten Hälfte des Trainingslagers (kontrovers zu NEUMANN et al. 2005)
- Schnelligkeit bis 60 Sek. ist in der Höhe begünstigt da ein geringerer Luftdruck herrscht → eventuell muss akzentuiert mit Lasten für einen eventuellen KA Reiz nachgeholfen werden (vergleiche Rekorde der olym. Winterspiele)
- Konzentrierte Be- und Entlastung, eventuell einschieben eines GA-Blocks
- Statuskontrolle des Gesundheits- und Ernährungszustands. (vor allem Eisen und Vitamin C)
- Belastungsintensitätsregulierung ab Höhen in 2200mH um 5-10% in der Trainingsgeschwindigkeit (Neumann et al., 2005)
- Im Schwimmen wird keine Geschwindigkeitsreduktion vorgenommen, hier wird über die Pausenlänge reguliert (s. Kapitel 12.1 & Neumann, et al., 2005).
- Bei intensiveren GA2 Einheiten muss die Regenerationszeit um 15% verlängert werden.
- Bei WSA Training und Kurzzeitwettkämpfen müssen die Pausen um 40% verlängert werden.
- Transformations/Regenerationsphase nach dem HTL min 10-14Tage (also länger als der Entlastungsrhythmus von 3:1 vorsieht)

## **9 Periodisierung des Höhentrainings**

### **9.1 Einordnung des Höhentrainings in den Jahresverlauf**

#### ***Wie sieht die Einordnung von einem oder mehreren HT in Verlauf eines Jahres aus?***

- Einmaliges Höhentrainingslager für Anfänger am besten am Ende der speziellen Vorbereitungsperiode ca. 10 Wochen vor dem HWK, um noch genügend Zeit zur Transformation der Trainingsreize in wettkampffnahe Belastungsformen zu lassen
- Mehrjährige Steigerung
- Zweimalige HT: 1. vorbereitend in der allgemeinen Vorbereitungsphase, 2. eines zur UWV bei Anschluss auf Weltspitze
- Höhentrainingsketten mit Höhenlagesteigerung
- HT als Gipfelbelastung eines jeweiligen Mesozyklus

Beispiel für einen HWK im JULI:

1. Höhentrainingslager im Dezember-Januar (semispezifisch allgemeine Konditionierung)
2. Höhentrainingslager im März ( GA 1/KA)
3. Höhentrainingslager im Mai-Juni (als UWV vorwiegend aeob/anaerob und SA-WSA)

## 9.2 Höhentrainingslagerkette mit Steigerung der Meereshöhe

- 3 Wochen 1800-2000Hm allgemeine Konditionierung (ca 40. Woche vor dem Hauptwettkampf)
- 3 Wochen 2400-2600Hm GA/KA (32-34 Wochen vor dem HWK)
- 3 Wochen 2400-3200Hm GA2/WSA (mit KA) (20-24 Wochen vor dem HWK)
- (6 Wochen 2400-3800Hm GA/KA/WSA(4-9 Wochen vor dem HWK))
- 1 Woche 1800-2000m Anschlussstraining WA/GA (2-3 Woche vor dem HWK) (REISS, 1989)

Höhentrainingslagerketten haben den Vorteil, dass der Organismus vorangepasst in weitere Höhentrainingslager geht und die Umstellung leichter und schneller abläuft.

(NEUMANN, 2005)

## 10 Belastungssteuerung

### ***Welche Belastungsparameter sind bei einem HT zu berücksichtigen?***

Kontrolle des aktuellen psycho-physischem Zustands:

- Täglich HF-Ruhewert & Körpergewicht
- Gewichtsabnahmen über 2kg sollten vermieden werden und sind Ausdruck für eine Überlastung
- HF- Kontrolle bei GA1 und KA Training (entsprechend eines Laktattests an der 2 mmol/l Schwelle (meist 130-150 S/min & 160-180 S/min bei KA)
- Steigt die HF bei Belastung um 8s/min zeigt das ein höheres Belastungsniveau an
- Die Erholung-HF wird meist nicht bestimmt. Als Richtwerte gelten HS nach einer Minute (normalbereich sind 30S weniger)
- Sollte die Ruhe-HF um 6 S/min steigen zeigt das eine Ermüdungssituation , bei 10 S/min kann ein Infekt/gesundheitliche Störung vorliegen
- Laktat Kontrolle bei extensiven GA1 und Kraftausdauertraining (ausschlaggebend ist die 2 mmol Schwelle für GA1 und 2-3mmol/l für KA)
- Laktat-Kontrolle bei intensiven Belastungen
- Kontrolle bewegungstechnischer Anforderungen
- Täglich Harnstoff (Proteinkatabolismus) und Kreatinkinase (Stoffwechselprodukt von KP)
- Richtwerte bei 10 mmol/l über mehrere Tage (Trainingsred.) Reizwirsame Trainingsbelastung bei 7-9mmol/l für Männer und 6-8mmol/l bei Frauen.
- Die Anstiegswerte liegen bei 0,5-1 mmol/l bei steigendem Proteinkatabolismus→ halber Tag Pause, KH!!!
- Ernährung (KH-reich), Eisenspiegel, Flüssigkeit

(REISS, 1998)

## **11 Ausblicke**

Das Höhenttraining ist unbedingt nötig in LZA zum Erreichen der Weltspitze innerhalb der UWV und um eine Steigerung des Trainingsreiznivaus für Leistungsentwicklungen im Flachland.

Künstliche Höhenbedingungen sollten ein sportartspezifisches Training zulassen. Unterdruckkammern, wie in Kienbaum, oder Masken, sowie abgeschlossene Räume mit Gasmischen sollten zur Vorbereitung eines Höhenttrainings in natürlichen Höhen genutzt werden. Das Prinzip „Sleep high-Train low“ hat keinen Effekt bei hochausdauertrainierten Sportlern, kann aber durchaus leistungssteigernd für Nachwuchssportler oder Höhenttrainingsunerfahrene haben.

Höhenttrainingslager sollten optimal mit Trainingssteuerungsmaßnahmen und trainingswissenschaftlicher Begleitung unterstützt werden. Die Überprüfung ist unabdingbar für die Feststellung von Veränderungen des Leistungszustandes (Regenerationsdynamik), für die Bereitschaft des Sportlers für weitere Trainingsreize (Belastungsverträglichkeit) und zum Ermitteln von Gesundheitszuständen.

(REISS, 1998)

## **12 Trainingswissenschaftlich relevante Untersuchungen**

Durch Bergsteigen in extremen Höhen (5000m) werden verschiedene Anpassungs- und Umstellungsmechanismen ausgelöst, allerdings kommt es nicht zu einer sportartspezifischen Verbesserung. Die extreme Anstrengung ohne Kraftreiz kann sogar Muskelschwund hervorrufen (BÖNING et al., 1997; STEINACKER et al., 1996; MAINBÄURL et al., 1986 aus NEUMANN et al. 2005).

### **12.1 Höhenttrainingsmaßnahmen in der japanischen Schwimm-Nationalmannschaft (Wakayoshi, K., 2005)**

Beim Schwimmen über 200m beträgt der Anteil der aeroben Energiebereitstellung bereits über 60-70% (OGITA, 1999). Das zeigt, dass die aerobe Energiebereitstellung leistungsbestimmender Faktor im wettkampfmäßigen Schwimmen darstellt. Im Wettschwimmen zielt das Höhenttraining daher auf die Verbesserung der Schwimmleistung durch die Steigerung der aeroben Kapazität. Außerdem zeigten Forschungen, dass sich durch stärkeres Intervall-Training unter Höhenbedingungen auch die anaerobe Kapazität verbessert (OGITA & TABATA, 1999).

Das Ergebnis der Wettkämpfe nach Höhenttrainingslagern konnte zu 41 % gesteigert werden. Eindeutig konnte die Linksverschiebung der Laktatleistungskurve kurz nach einem Höhenttrainingslager beobachtet werden. *Allerdings setzt verschiebt sich die Laktatleistungskurve nach Reaklimatisation nach rechts.* Im Schwimmen ist die im Wettkampf maximal geschwommene Zeit ungefähr 15min bei 1500m, das bedeutet eine hohe lokomotorische Geschwindigkeit realisieren zu können; höher als in den Langlaufdisziplinen, deren Dauer meist bei ca. 30min für 10000m liegt. Bei Höhen über 2500m kommt es bereits bei Belastungsintensitäten zwischen 50-75% der maximalen HF zu Erschöpfungen. Die realisierbare Geschwindigkeit sollte aber nicht vernachlässigt werden, da es sonst zu Verschlechterungen der Schwimmtechnik kommt. Um den Schwimmer in der Höhe nicht zu überlasten werden ihm Höhen zwischen 1500-2300mH empfohlen. Hier ist eine effektive

Anpassung des Atmungs- und Kreislaufsystems zu erwarten und ein ausreichendes Techniktraining kann absolviert werden.

Im Schwimmen hat sich ein Makrotrainingsplan von 4 Wochen Höhengaufenthalt durchgesetzt. Er führte bei 50% der Schwimmer zu einer Leistungsverbesserung, da die Trainingsinhalte lange genug für eine Vorhaltanpassung durchgeführt werden können. Dabei sind 1 Woche Anpassung, 2 Wochen Abhärtung und 1 Woche Regulierung vorgesehen. Bereits eine Woche nach dem Höhengaufenthalt ist der Schwimmer in der Lage einen Wettkampf mit 100% seines erworbenen Potenzials zu bestreiten. Dies liegt vor allem an der genügenden Regulierung noch während des Höhengaufenthaltes, was den Schwimmer nicht zu einer verlängerten Regulierung im Flachland zwingt. Zwei andere Makrotrainingspläne (3 Wochen Höhengaufenthalt mit jeweils einer Woche Anpassung, zwei oder 2 1/2 Wochen Abhärtung und einer bzw. 1/2 Woche Regulierung in der Höhe) hatten den Effekt das entweder den Trainingsinhalten nicht genug Zeit gewidmet werden konnte (2 Wochen Abhärtung) oder das die Regulierung im Flachland verlängert werden musste, da die Regulierung in der Höhe nicht ausreichend war.

Während der Anpassungsphase wurde überwiegend aerobes Training und alaktazides Schnelligkeitstraining durchgeführt. In der zweiten Woche wurde die Distanz erhöht, um dann in der dritten Woche die Distanz zugunsten der Intensität zu verringern. Die vierte Woche wurde das Training sowohl qualitativ als auch quantitativ verringert.

## **12.2 Höhenttraining für Kampfsportarten (LEHMANN/HEINISCH, 2000)**

Die Fragestellung ist ob sich ein Höhenttraining für nicht Ausdauersportarten (hier Kampfsportarten) als effektiv erweist und welchen Zweck es erfüllt.

Grundlegende Fragen sind:

- In welchem jahreszeitlichen Abschnitt soll ein HTL für Kampfsportarten stattfinden?
- Können Höhenttrainingslagerketten empfohlen werden?
- Welcher Kaderkreis kann von HTL profitieren?
- Welche Anpassung kann durch ein HTL bei Kampfsportlern erreicht werden?
- Welche Auswirkungsmechanismen hat ein HTL auf die spezielle Leistungsstruktur der Kampfsportarten?

Als erstes muss dafür das Anforderungsprofil der Kampfsportarten geklärt werden. Kampfsportarten zeichnen sich durch eine anaerob-alaktazide bis hoch anaerob-laktazide Stoffwechsellage während des Wettkampfes aus. Die hohe energetische Anforderung und die teilweise mehrmals stattfindenden Wettkämpfe am Tag fordern nach einer hohen Laktatverträglichkeit, einer hohen Leistung an der anaeroben Schwelle und einer ausgeprägten aeroben Ausdauer als Grundgerüst für höhere Belastungen und für eine bessere Regeneration. Hinzu kommen komplizierte Steuerungs- und Regelungsprozesse gepaart mit hohen kognitiven Anforderungen, zum Vollziehen der sportlichen Technik, psychischen Willensspannkraft und Willenstoßkraft. FUCHS/REISS empfehlen für Kampfsportarten ein Höhenttrainingslager in der Vorbereitungsperiode und in der UWW. Einschränkungen leiten sie von dem Grundlagenniveau der Sportler ab. Sie grenzen die Empfehlungen auf den Spitzendbereich ein, da sie von einer geringeren allgemeinen Leistungsfähigkeit im Nachwuchssport der speziellen Sportarten ausgehen.

LEHMANN/HEINISCH (2000) kritisieren diese Empfehlungen, da sich in ihrer Untersuchung vor allem die Junioren in der allgemeinen Ausdauer verbesserten im Vergleich zu der Leistungsspitze. Sie konnten allerdings keine weiteren Verbesserungen 3 Wochen nach dem HTL, nach einer Verbesserung der Leistung an der aeroben und anaeroben Ausdauergerade am Ende des HTL, feststellen. Dies führen sie höchstwahrscheinlich auf eine nicht genügende Anpassung an die Höhenbedingungen zurück, da der Aufenthalt von 3 Wochen eventuell als zu gering eingeschätzt werden kann, um effektive Anpassungsmechanismen auf allen Ebenen des Stoffwechselsystems zu erwerben. Die Empfehlungen von Experten für ein HTL sind mindestens 3 Wochen besser 5-6 Wochen für höhere Anpassungen. Für effektive Anpassung und genügend Zeit zum Abschließen der Trainingsabschnitte (Akklimatisation, Abhärtung und Regulierung) werden mittlerweile einheitlich (WAKAJOSHI, 2005; REISS, 1989 u.a.) 4 Wochen HTL empfohlen. Eventuell können auch bessere Erfolge bei dem Nachwuchs aufgrund von schnellerer Verbesserung durch weniger Trainingsalter erzielt werden. Der Nachwuchs scheint physisch stark genug für ein HTL zu sein und noch genügend Spielraum für neue Trainingsreize mitzubringen, dies wird mit steigendem Trainingsalter schwerer. Eventuell muss methodisch für den Spitzensport anderes gearbeitet werden wie im Nachwuchsbereich.

LEHMANN/HEINISCH weisen auf die durchweg besseren Ergebnisse bei submaximalen Leistungsstufen hin, als Konsequenz für eine bessere aerobe Leistungsfähigkeit, auf eine bessere Leistungsfähigkeit an der anaeroben Schwelle und auf eine bessere Maximalleistung bei gleichem maximalen Laktat. Als kritisch bewerten sie die Übertragung von Trainingsregimes des Flachlandes in die Höhe, da es zu Überlastungen kommen kann.

LEHMANN/HEINISCH (2000) schlussfolgern eine positive Entwicklung für alle Kader im Kampfsport in energetischen-konditionellen Aspekten und als Konsequenz mehr Zeit, eine schnellere Regeneration und mehr psychischen Willen für Technik- und Taktik, sowie höhere Trainingsbelastungen. Des Weiteren konnte die Verbesserung des anaerob-laktatiden Anspruchsniveaus der Sportarten dargelegt werden, durch eine bessere aerobe Leistungsfähigkeit als Grundlage. Höhentrainingsketten beurteilen LEHMANN/HEINISCH (2000) als kritisch, da der Haupttrainingsinhalt in einem HTL aufgrund des schlechteren Leistungsniveaus der Kampfsportler auf der Verbesserung der aeroben Leistungsfähigkeit und den Kraftausdauerfähigkeiten liegt. Deswegen empfehlen sie das HTL für Kampfsportler in der Vorbereitungsperiode, um dann die Transformation in spezielle Trainingsinhalte im Flachland auf höherem Niveau gestalten zu können. Sie sprechen ausdrücklich auf eine Veränderung der Trainingsmethodik (längere Pausen, Reduzierung der Belastungsintensität um 10-15%) und die regelmäßigen Trainingssteuerungsmaßnahmen zum Überprüfen der Leistungsfähigkeit und Belastungsdynamik um Übertrainingszustände zu vermeiden.

Letztendlich sprechen die Autoren noch auf den sozialen Charakter eines gruppenspezifischen HTL an, dem positive motivationale Aspekte zugrunde liegen.

## 12.3 Höhenakklimatisation (Mairbärl, H., 2000)

### 12.3.1 Ventilation/Druckausgleich

Mit zunehmender Höhe sinkt der O<sub>2</sub>-Partialdruck (PO<sub>2</sub>) proportional zur Abnahme des Luftdrucks. Die O<sub>2</sub> Versorgung des Organismus hängt vom Gasaustausch und daher der inspiratorischen PO<sub>2</sub>, der Größe der Ventilation (alveolärer PO<sub>2</sub>), der Gasaustauschfläche und der Durchblutung der Lunge (PO<sub>2</sub> im Blut) ab. Im Blut wird das O<sub>2</sub> an Hämoglobin in den Erythrozyten gebunden, sauerstoffhaltiges Blut wird durch das H-K-System im Körper an die einzelnen Organe und Gewebe verteilt.

Der O<sub>2</sub> Gehalt der Lunge (alveolare PO<sub>2</sub>) ist durch Beimengen von CO<sub>2</sub> und Wasserdampf (H<sub>2</sub>O) niedriger als der PO<sub>2</sub> der Umgebungsluft. Dadurch kommt ein Sauerstoffdruckgefälle zwischen der Umgebungsluft und der Alveolarluft zustande.

Während des Höhengaufenthalts wird dieser Unterschied kleiner, was der Organismus mit dem einsetzen der Hyperventilation durch den Hypoxiereiz auf die Chemorezeptoren in der glomus caroticum (Hauptschlagader) zu kompensieren versucht.

Hoch trainierte Ausdauersportler reagieren weniger auf den Reiz („weak Responder“), dadurch kann sich anfangs einer Höhenexposition ein Lungenödem entwickeln, wenn die körperliche Belastung zu groß ist.

Während des Höhengaufenthaltes steigt die Ventilation weiter an und führt zum vermehrten Abatmen von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O, das Blut kann wieder mehr O<sub>2</sub> binden.

Durch das vermehrte Bilden von CO<sub>2</sub> und Wasser werden dem Blut H<sup>+</sup> Ionen entzogen ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ ). Das Blut verliert seine Puffereigenschaft, es kommt zu einer respiratorischen Alkalose, die grundsätzlich durch eine renale Bikarbonat-Ausscheidung kompensiert werden kann, wodurch das Plasma Bikarbonat abfällt. In mittleren Höhen ist dieser Mechanismus schon nach 24 h abgeschlossen, in extremen Höhen bleibt die Alkalose bestehen. Dies macht sich bemerkbar durch eine Ansäuerung des Blutes bereits bei submaximaler Belastung. Eine weitere Gegenregulation bietet dann die Erhöhung des Hämoglobin und des intraerythrozytären 2,3 DPG Aktivität.

Höhenalkalose, Hypokapnie führen zu einer Erhöhung der Bindung des O<sub>2</sub> an das Hb; dagegen die Temperaturerhöhung in der Peripherie (relativ zur Lunge) und ein Anstieg des 2,3 DPG zu Förderung des O<sub>2</sub> an das Gewebe.

Hypokpnie:

### 12.3.2 Sauerstoffbindungskurve

In mittleren Höhen ist die O<sub>2</sub>-Bindungsfähigkeit leicht vermindert, jedoch die 2,3 DPG Aktivität leicht erhöht was zu einer vermehrten Abgabe des O<sub>2</sub> an das Gewebe führt.

In höheren Höhen überwiegt die Bindungsfähigkeit (O<sub>2</sub>-Hb) der Aktivität des 2,3 DPG. Der Sauerstoffpartialdruck im Blut fällt, der O<sub>2</sub> Gehalt wird jedoch versucht aufrecht zu halten. Dies ist auf die Reduktion des Plasmavolumens und der Bildung von Retikulozytenzahl (1-2 Tage alte Blutkörperchen, reifen in der Blutbahn zu Erythrozyten) bei Auswaschung aus dem Rückenmark in den ersten Tagen des Höhengaufenthaltes zurückzuführen. Der weitere Anstieg der Retikulozyten basiert auf der gesteigerten Erythropoese durch Bildung des Erythropoetin, welches das Enzym REF

aus der Niere aus einem Protein des Blutplasmas spaltet. Die gesteigerte Erythropoese zieht einen erhöhten Eisenbedarf mit sich und verursacht eventuell einen erniedrigten Ferritinspiegel.

Ab Höhen von 4000-5000m kann der Körper nicht mehr mit der Kompensation (Bildung von Erythrozyten um mehr Sauerstoff zu binden) nachkommen. Es kommt zu einem exponentiellen Abfall der Bindung von Sauerstoff ans Gewebe je höher der Aufenthalt über dem Meeresspiegel.

### 12.3.3 Herz, Kreislauf

In akuter Hypoxie ist das HMV ( $HF \times SV$ ) um 20% erhöht. Das maximale HMV ist dabei vermindert. Fortlaufend normalisiert sich das HMV bei Belastung und Ruhe, allerdings bleibt das max. HMV vermindert. Anfang nehmen SV und HF zu, doch das SV nimmt mit Zunahme des Hämoglobins und bestehendem Reiz (Gewöhnung) auf den Sinusknoten ab. Die HF bleibt bei längeren Aufenthalten erhöht, allerdings sind maximale und submaximale HF vermindert.

Kurz:

- In akuter Hypoxie ist das HMV durch HF und SV erhöht
- Das max. HMV ist allerdings durch früheren Belastungsabbruch, durch Übersäuerung vermindert
- Bei chronischer Hypoxie vermindert sich das HMV und fällt unter Werte des Ausgangsniveaus, aufgrund des hohen HK
- Dies bedingt eine weitere Abnahme der körperlichen Leistungsfähigkeit
- Ausnahme bildet die HF, die bleibt in Ruhe erhöht, fällt allerdings auch unter submaximalen und maximalen Belastungen, da Laktatkonzentration die Ausbelastung verhindert

In der Muskulatur kommt es zu einer hypoxiebedingten –Gefäßerweiterung durch Einstrom von Ca (bedingt durch eine Öffnung der ATP-hemmenden K-Kanälen.) Dies führt zu einer Hyperpolarisation und zum Verlust von Kontraktilität der Muskulatur.

Anhaltender O<sub>2</sub> Mangel führt durch eine Störung der Energiebereitstellung zu einer Einschränkung der chemischen, mechanischen und osmotischen Arbeit der Zellen. Um dem Zelltod entgegenzuwirken reduziert die Zelle alle Energie-verbrauchenden Reaktionen (Hemmung der Na/K-ATPase, Ca-ATPase, der Proteinsynthese). Zur chronischen Anpassung werden glykolytische HIF- $\alpha$  vermehrt: Myoglobin, Zitratzyklus der Atmungskette. Zum Schutz der Zelle wird die Kapazität des anaeroben Stoffwechsels gesteigert, andererseits auch die geringe Menge an O<sub>2</sub> besser genutzt.

Kurz:

- Gefäßerweiterung und Einstrom von Ca
- Hyperpolarisierung und Verlust der Kontraktilität der Muskulatur
- Störung der Energiebereitstellung führt zur Einschränkung der chemischen, mechanischen und osmotischen Arbeit der Zelle
- Um Zelltod zu vermeiden werden energieverbrauchende Reaktionen reduziert
- Im Gegenzug wird Myoglobin, Zitratzyklus und Atmungskette vermehrt
- Zum Schutz der Zelle wird die anaerobe Kapazität gesteigert und O<sub>2</sub> besser genutzt