

## **Sportmedizin 2 SS 09**

### **Lektion 7 Höhenanpassung**

(Es ist sinnvoll, sich hierzu aus Sportmedizin 1 die Lektionen Sauerstoff, Atmung und Blut anzusehen)

**Eingangs sei an ein paar Zahlen erinnert: pO<sub>2</sub> Außenluft 150mmHg, Alveolarluft 100mmHg und pO<sub>2</sub> arteriell 100mmHg.**

**Atemminutenvolumen in Ruhe z. B. 8 l, O<sub>2</sub>Aufnahme in Ruhe 300 ml/min, O<sub>2</sub>max z. B. 3l /min., Herzminutenvolumen z. B. 5l in Ruhe.**

**Erinnert sei an Homöostase: Der Organismus ist bemüht/gehalten, bestimmte Werte der Funktion wegen ihrer lebenswichtigen Bedeutung auf alle Fälle einzuhalten. Dazu gehören die Körpertemperatur, das pH von 7,4 und die Normoxie (gute Sauerstoffversorgung). Man verträgt nur äußerst begrenzte Zeit der gestörten Homöostase, daher hat der Organismus Instrumente zur Verfügung, sie zu sichern, aber er kann damit auch überfordert sein und schließlich Gesundheit und Leben verlieren, wenn Grenzwerte überschritten werden. Am leichtesten hat es der Organismus, seine Homöostase im Ruhezustand aufrecht zu erhalten.**

#### **A. Allgemeine Gegebenheiten der Höhenexposition**

**Eine Höhenexposition im obigen Sinne ist immer eine Herausforderung an die Einhaltung der Homöostase. Es gibt weniger Sauerstoff, es gibt einen Temperaturabfall und zunehmende Probleme im Gleichgewicht von Säuren und Basen (das Thema der Strahlenbelastung sei hier ausgespart).**

**Gäbe es für uns keine körperlichen Maßnahmen der Kompensation, wir müssten mit den noch unangepassten Funktionen der Meeresspiegelhöhe auskommen, wir hätten große Schwierigkeiten von den ersten Metern eines Aufstiegs an - (dem Bewohner im dritten Stock des Hauses ginge es schlechter als dem im Parterre, das Mittelgebirge wäre eine große Last!)**

**Es zeigt sich aber, das Höhen von bis zu 2000 m so gut kompensiert werden können, dass auch Angeschlagenen der Urlaub im Mittelgebirge nicht ausgedet werden muss. (Und auch im Flugzeug werden hinsichtlich des dort eingestellten Luftdrucks Mittelgebirgsverhältnisse ohne besondere Bedenken akzeptiert. Meeresspiegelverhältnisse wären technisch sehr teuer. Nur Herzoperierten wird eine schonende Flugabstinez von wenigen Wochen geraten. Wird der Höhengaufenthalt nicht kompensiert, gibt es in den Organen Sauerstoffmangel mit Leistungseinbußen (Ergänzung S.7).**

### Für uns wichtige Stufen der des Höhengaufenthaltes

Man muss den plötzlichen Aufenthalt in der Höhe von dem durch „Gewöhnung“ über Wochen angepassten unterscheiden. Ersterer heute im Wintersport und mit den Lifts sehr häufig, auch durch Tourismus im Gebirge sehr gefragt (auch Flüge ohne Druckausgleich).

Hochgebirgstourismus/Hochgebirgssport wird zunehmend praktiziert und nicht immer sorgfältig vorbereitet.

Es stellen sich unterschiedlich ernsthafte Probleme, ob es um jene Höhen geht, die bis 2000m reichen und noch gut kompensierbar sind, oder um Höhen über 3000 oder gar 4000m, wo nur noch reduzierte Möglichkeiten zur Kompensation drastischer in Erscheinung treten. Es sei erinnert: Typisches Höhenttraining findet meist im Bereich von 2000 bis höchstens 3000 m statt (mittlere Höhenlage. Immerhin die Spiele in Mexico in 2200 m, Höhe, Meisterschaften im Wintersport oft in sehr hohen Lagen).

### B Höhenexposition mehr im Detail

Der Luftdruck von 760mmHg in Meereshöhe nimmt nach oben exponentiell ab, zunächst aber im unteren Bereich 8 mmHg pro 100m. in 8000m nur noch 267 mmHg, in 12000m noch 145mmHg.

In unserer Einatemungsluft ist dann  $pO_2$  entsprechend weniger, denn der Sauerstoffanteil der Luft beträgt nur 20,9%. Da die Luft in der Luftröhre mit Wasserdampf gesättigt wird (bei gleichzeitiger Temperaturerhöhung), was für das  $pO_2$  anzurechnen ist, haben wir in der Trachea dann ein  $pO_2$  von rd. 150 mmHg - in der Höhe entsprechend des generellen Druckabfalls und analog zum Abfall des äußeren Luftdrucks. entsprechend niedere Werte (in 5000m ist der Wert halbiert, beträgt in 8000m noch 46 und in 12000m 21mmHg).

(Wasserdampf: Die Trachealluft mit dort mit Wasserdampf gesättigt, hat rd. 40g davon im Kubikmeter, in 2000m davon nur noch die Hälfte, auf Null Grad abgekühlte Luft hat nur noch 5g, Wasserdampfmangel wird als reizend und auch stark reizend und schon dadurch als leistungsmindernd erlebt).

Das  $pO_2$  der Alveole, in die ja die Trachealluft gelangt, ist dann nur noch 100mmHg groß (besser „klein“). Und dieses steht dann dem venösen Blutrücklauf aus dem Körper gegenüber, das im Ruhezustand rd. 40mmHg (bei guter AV-Differenz und Belastung weniger) beträgt. Bei hinreichender Kontaktzeit liegt dann ein  $pO_2$  im arteriellen Blut von ebenfalls 100mmHg vor. Dann sind bekanntlich 200ml Sauerstoff in einem Liter Blut!

(Wie kommt die Verschlechterung vom  $pO_2$  der Alveole gegenüber der eingebrachten Trachealluft zustande? In der Alveole ist in der Regel Restluft, immer geht Sauerstoff ins Blut, immer kommt Kohlendioxyd aus dem Blut in die Alveole - also ein recht buntes Gemisch.

Es kommt hinzu, dass bei Belastung auch in der Höhe die Atemzüge tiefer werden, damit mehr alveolare Ventilation. Dadurch die Konzentration vom Sauerstoff in der Alveole nicht so ausgeprägt abgefallen, wie ohne diesen Ventilationstyp errechnet

Auch das  $pO_2$  der Alveole macht diesen entsprechenden Abgang mit der Höhe mit, so dass in 5000m nur noch knapp die Hälfte von 150 mmHg dem Blut angeboten werden können, also um die 50 mmHg.

Vom ersten Schritt nach oben an müsste dieser Abbau der Versorgung von Nachteil sein, wenn es mit der Blutsättigung linear weiter ginge.

Nun erinnere man sich an die Sauerstoffbindungskurve (siehe Lektion Blut in Sportmedizin 1)

Aufstiege bis zu rd.2000m lassen jedoch bei entsprechend reduzierend  $pO_2$  der Alveole noch weitgehend vollständige Sättigung des Blutes zu. Erst dann und noch deutlicher ab 3000m fällt die Bindungskurve dann steiler ab. Bei 5000m Höhe ist die Sättigung dann nur noch 70%. Also viele Hbs bekommen keinen Sauerstoff mehr.

Es ist ein Glück für unsere Aufenthalte bis ins Mittelgebirge hinein, dass die Sauerstoffbindung ans Blut nicht gleich mit dem Aufstieg gemindert wird. Aber dann nach 2000 und nach 3000 m fällt diese Begünstigung weg und das ganze übrige Programm der Kompensation ist vordringlich gefragt

Zwei Probleme der Höhe sind noch zu nennen: Die nachlassende Luftdichte auf der einen Seite, und die nachlassenden  $pO_2$ s mit ihrer folgenden Hypoxie im Gewebe auf der anderen - falls die Kompensation nicht ausreicht – nicht gelingt.

Zunächst die Luftdichte, deren Nachlassen mit der Höhe einige Vorteile bringt. Bei der Atmung wird der energetische Aufwand für die Atmung gemindert, es können mehr Volumina ökonomischer bewegt werden (das schon im Flachland bekannte Problem der nachteiligen Wirbelbildung im hoch intensivierten Atemstrom ist dann auch in der Höhe noch mehr gegeben, wenn bis zu 150l Luft pro Minute geatmet werden

Bei Bewegungen in der Höhe ist der Luftwiderstand geringer, es gibt in einigen Disziplinen/Sportarten Gewinne, die besonders bei schwerpunktmäßig anaeroben Aktionen durchschlagen: Der Sprint hat eine Situation wie bei mehr als 1 Sekunde Rückenwind, der Kugelstoßer tut dies 5cm weiter, die Langwerfer 50 bis 100cm weiter. Auch der 5000 m-Läufer, so eine vorliegende Berechnung investiert normalerweise 10% der Laufenergie in den Widerstand der Luftdichte, so dass auch er zumindest hier Vorteile hat, die aber nicht gegen das  $CO_2$ -Problem standhalten.

Nun zu den Anpassungsmaßnahmen des Organismus, die beschriebene  $pO_2$ -Situation ist Realität! Der Sauerstoff reicht nicht!

**Hypoxie-Gefahr. Bei Aufstieg – unvorbereitet und evtl. noch sehr rasch (Lift) ist keine Zeit zur Anlage neuer Strukturen und Funktionen. Der „Aufsteiger „muss nutzen, was er gerade schon hat!**

**Zunächst aber noch einige wichtige Positionen:**

**Eine konkrete Belastung hat im Flachland wie in der Höhe den gleichen Energiebedarf (man lasse hier mal das Luftdichteproblem draußen vor).**

**Der Sprint kommt mit seiner fast totalen anaeroben Energiegewinnung gut weg, er hat deswegen keine Verluste, denn er leidet nicht unter der pO<sub>2</sub>-Situation der Höhe (wobei wir nur an die mittleren Höhenlagen denken, nicht an Extreme - der Vorteil der Luftdichte kommt dazu!**

**Belastungen um 2 Minuten (also z. B. der 800m Lauf,) haben nur zur Hälfte aeroben Energiegewinn, der vom Sauerstoff-Leck getroffen wird. Fast doppelt solange Belastungszeiten (etwa 4 Minuten wie bei mäßigen Läufen über 1500m haben einen rd. 75%igen aeroben Energiegewinn und sind folglich stärker betroffen.**

**Solange submaximal gelaufen wird, kann es diesen Läufern so ergehen, wie dem Urlauber im Mittelgebirge, Sauerstoff reicht noch! Geht er aber in die vollen im Sinne von O<sub>2</sub>max, dann büßen beide ein, der 1500er mehr als der 800er. O<sub>2</sub>max ist in Mexico bei 2200m schon um 15% niedriger, in 4000m um 30%.**

**Mindestens ab 2000 und mehr noch ab 3000 m – wenn die Gunst der Bindungskurve wegfällt - muss mehr und früher auf anaerobe Beteiligung beim Energiegewinn gesetzt werden. Es gibt also Intensitäten, die im Flachland noch aerob dominiert sind, aber in Höhen dann mehr anaerob werden. (Subjektiv und objektiv ist es so, als werde mit jeder Anhebung der Höhe die Belastung gegenüber gleicher im Flachland auch angehoben, fällt schwerer. Der in der Höhe dazu verführte Athlet, im Training die gewohnten Intensitäten wie unten zu laufen, gerät alsbald ins anaerobe Trainieren, er gewinnt aerob nicht im gewünschten Maße dazu.**

**Anpassung ( Kompensation) bei akutem Aufstieg:**

**Der Gedanke liegt auf der Hand, dass bei weniger Sauerstoff im Atemvolumen und Blutvolumen (in der Zeiteinheit) es zu Mangel und Hypoxie kommt. Also muss mehr Luft und mehr Blut bewegt werden – vielleicht das Doppelte in 5000m Höhe?**

**Beide Wege werden nach wenigen Augenblicken schon begangen.**

**Die Messstationen im Aortenbogen und der Halsschlagader melden der Atemzentrale im Hirnstamm den Mangel an Sauerstoff, die Atmung wird forciert. Da hier eine leistungsbezogene Herausforderung gegeben ist, ist**

**die Ausschüttung von Adrenalin/Noradrenalin nur folgerichtig, auch die Durchblutung in arbeitenden Muskeln wird somit durch Gefäßöffnung verbessert. Dilatation!**

**Das Atemminutenvolumen wird über Frequenz und Atemzugtiefe erhöht, dieses mit dem Höhengewinn weiter erhöht, Die Zunahme der Atmung tritt in Höhen ab 2000 und 3000m deutlicher hervor – kein linearer Kurvenverlauf (s. Sauerstoffbindungskurve!)**

**Mit der Mehr-Atmung taucht ein Problem auf, denn es entsteht ein verstärkter Anfall von CO<sub>2</sub>, der größer ist als der aus der Verstoffwechslung bei der aeroben Energiegewinnung. Mehr CO<sub>2</sub> wird auch abgeatmet. (Sie wissen, dass CO<sub>2</sub> die Atmung forciert) Mit dem Verlust von mehr CO<sub>2</sub> ist eine Verschiebung nach dem Alkalischen verbunden, Bicarbonat (HCO<sub>3</sub>) steigt an, denn es steht für Alkalose, bei der Funktionsstörungen drohen. Zur Rettung der Lage wird jetzt mehr Bicarbonat mit dem Urin ausgeschieden, die Alkalose abgebaut. Kommt nun aber starke Aktivität (Sport) in der Höhe dazu, fallen erneut H-Ionen an, denen kein reiches Angebot an Bicarbonat zur Neutralisation gegenüber steht. Die Ausscheidung von Bicarbonat ist also letztlich in ihrer Größenordnung ein Kompromiss! (im übrigen: Auch im Erythrozyten erfolgt auf enzymatischem Wege eine Pufferung von H-Ionen, also nicht nur durch Bicarbonat.**

**Schließlich: Auch das Herzminutenvolumen muss mit der Höhe ansteigen, was nutzt mehr Sauerstoff in der Alveole, wenn es nicht entsprechend im Blut transportiert wird. Auch dies nicht linear, sondern besonders ab 2000 bis 3000 deutlicher.. Entscheidend ist hierfür die Pulserhöhung, die in großer Höhe z. B. schon `Ruhewerte um 100 pro Minute erreichen kann. (Schlagvolumen und RR sind wenig bis nicht betroffen, ersteres dann in größeren Höhen sogar abnehmend.**

**Alle Anpassungen (akute und die noch zu besprechende „chronische“ Anpassung) sind nicht dazu imstande, alles zu kompensieren, Gewebshypoxie zu vermeiden. Mit der Höhe nimmt zunächst die maximale Leistungsfähigkeit ab (O<sub>2</sub>max), Submaximales geht noch, später nimmt dann auch die submaximale ab, und am Ende ist selbst der Ruhebetrieb nicht mehr zu halten - am Ende Tod!**

Bei den olympischen Spielen in Mexico in 2200m Höhe war in den klassischen Langstrecken ein Leistungsminus von rd. 6% selbst bei den gut angepassten Athleten nach mehrwöchigem Höhenttraining zu verzeichnen. Bei andernorts getesteten Eisschnellläufern wurden rd. 4% Minus gemessen

**Anpassung durch längere Aufenthalte in Höhen geben dem Organismus Gelegenheit, sich gründlicher umzustellen, Defizite zu kompensieren.**

**Und dies z. T auch ohne Training, nur durch Aufenthalt. Sportliches Training in der Höhe (s. u.) sei nicht länger als 3 Wochen nötig und erfolgsträchtig, könne aber durch mehrere Einsätze dieser Art im Jahr zu dauerhafteren Ergebnissen führen, nicht nur zu kurzfristigen.**

**Expeditionen und Einzelkämpfer, die Extremhöhen anpeilen, nehmen längere Höhentaufenthalte.**

Die schon akut genannten Reaktionen der Atmung und der Blutvolumina werden beibehalten, stabilisiert, oft auf etwas niedrigerem Niveau. Dazu kommen dann Kapillarisationen, ihr folgende bessere arteriovenöse Sauerstoffausnutzung. Mitochondrien werden aktiviert, Enzyme aktiver. Mehr Myoglobin zur Sauerstoffspeicherung.

Ein ganz besonderes Thema dabei ist Erythropoetin – kurz Epo, das auch in der Dopingszene (s. Lektion Doping Sportmedizin 2, Lektion 8) eine hervorragende Stellung neben den Anabolika einnimmt. Es ist dies ein Gewebshormon, das bei eintretendem Sauerstoffmangel von der Niere ausgeschüttet wird und für eine Nachlieferung roter Blutkörperchen zuständig ist.

(Es werden im Knochenmark „ruhende“ Stammzellen aktiviert, die dann Vorläuferzellen der roten Blutkörperchen ins Blut schicken (dort im Blutbild nachweisbar- Reticulozyten) letztendlich zu Erythrozyten ausreifen, die rd. 120 Tage agieren und dann untergehen. Dann ist Epo wieder zur Auffrischung gefragt. Neuere Beobachtungen ergeben, dass Epo es wie ein Wachstumshormon auch mal zu Tumorwachstum bringen kann.

Klar, dass über Epo höhere Ery-Zahlen resultieren, dass Blut bei Hämatokrit-Werten über 50 – bis hin zu 70% höhere Viskosität des Blutes bedingt, mehr Herzarbeit beansprucht (Thrombosegefahr!) und den Gewinn an mehr Sauerstofftransport im Blut teilweise wieder tilgt. Logisch, dass alle roten Blutkörperchen nicht viel bewirken, wenn in Extremhöhe kaum noch Sauerstoff im „Angebot“ ist.

Das Anspringen der Epo-Wirkung benötigt die erste Woche (vielleicht auch 2 Wochen) des Höhenaufenthalts.

Schon wenige Tage nach dem Aufenthalt in der Höhe wird eine Zunahme der roten Blutkörperchen gesehen, die aber Epo-Wirkung nur vortäuscht. Das Plasma verliert sogleich Wasser, das Blut wird dadurch eingedickt und weist mehr Erythrozyten auf, ohne dass ihre Gesamtzahl erhöht ist – Hämokonzentration!

Ein Blick noch auf die Extremlage: Hier haben äußerst gut angepasste Bergsteiger inzwischen sogar 8000er ohne Sauerstoffgeräte bewältigt und dort sogar noch agiert.

Aber in der Tendenz sind diese Höhen von weitgehendem Einbruch der Kompensationen gekennzeichnet. Zum Beispiel gehen Eiweiße kaputt und sind nicht mehr hinreichend zu ersetzen. Es gibt Muskelverluste schneller und langsamer Fasern. Entsprechend werden auch die bis dahin angehobenen Atem- und Blutvolumina einbrechen. Das Herz ist pumpschwach. Riesige Wasserverluste (4,- 5 und 6 Liter) erschweren alle Funktionen). Typische Höhenkrankheiten s. u.).

Anaerobe Belastung kommt wegen der Schwierigkeit, mit H-Ionen noch fertig zu werden, schnell an seine Grenze.

Nun zum Höhentraining: Unterschiedliche Mitteilungen, ob es nutzt oder nicht. Man hat mit Respondern zu rechnen, die auf das Höhenttraining positiv reagieren, und mit Non-Respondern, die oben genannte negative Wertungen erklären können. Unstrittig die Bedeutung des Höhenttrainings für Wettkämpfe in der Höhe – Typ Mexico.

Für sportliche Ziele eignet sich, wie schon gesagt, nur die mittlere Höhe von 2000 bis 3000m, wie hier submaximale Belastungen besser das gewollte

**aerobe Training gewährleisten als bei größerem Höhen.**

**Da aber die Trainingsintensitäten dabei einen Schuss geringer als die gewohnten aus dem Flachland sind, fehlt im Saldo Trainingsintensität für bessere Wirkungen. Man bevorzugt daher ein System des täglich vielstündigen Aufenthalts in der Höhe, aber Training im Flachland. Es gibt sogar die Überlegung des umgekehrten Vollzugs, Training in der Höhe, Aufenthalt im Flachland?)**

**Zuletzt noch ein paar Informationen zur Höhenkrankheit, zum Lungenödem und zum Hirnödem.**

**Das Gehirn reagiert auf Hypoxie besonders empfindlich. 3 definierte Krankheiten sind zu nennen: Höhen-oder Bergkrankheit, Lungenödem und Hirnödem.**

**Bei raschem Aufstieg können Symptome der Bergkrankheit schon in mittleren Höhen auftreten, die beiden letztgenannten sind mit Ausnahmen wesentlich Erscheinungen in großen Höhen – von Piloten in nicht druckangepassten Flugzeugen erfährt man gelegentlich!**

**Bergkrankheit: Zunächst ein undramatischer Verlauf: Nach 1-2 Tagen Kopfschmerzen (die noch auf Schmerzmittel reagieren), Appetitlosigkeit und Schlaflosigkeit. Das spätere Stadium ist dann unmissverständlich: Kopfschmerzmittel wirken nicht! Übelkeit/Erbrechen Koordinationsstörungen (Gang!), gelegentlich auch Lähmungen oder Anfälle. Gefährlich ist die im Übergang euphorische Verstimmung, die notwendige Maßnahmen außer Acht geraten lässt. Auch hier bei ungebremster Höhenexposition über Bewusstseinsstörung und Koma der Tod.**

**Lungenödem (Überschwemmung im Lungengewebe, hoher Druck in der Pulmonalarterie) Eine lebensbedrohliche Situation, die mit Symptomen beginnt, die an Lungenentzündung denken lassen – Husten, Kurzatmigkeit, Zyanose)**

**Das Hirnödem mit Druckerhöhung im Schädelinnern, die dem Gehirn massiv schadet.**

**Bei der Entstehung spielt eine Rolle, dass bei Hypoxie Adern sehr geöffnet werden, was im Gehirn zu Raumnot und Druck führt (etwa wie beim Tumor). Auch hier schwerste Symptome und akute Lebensgefahr. Über neurologische Symptome und Koma der Tod.**

**Es ist zwingend, dass hier eingegriffen wird. Der Aufstieg ist zu stoppen, Ruhe! Anstrengungen sind zu vermeiden. Bei den schweren Verläufen oder im Falle, dass sie zu erwarten sind, ist Abstieg notwendig, soweit realisierbar.**

**Letztlich sind die schweren Verläufe eine Phase des tödlichen Ausgangs nicht bewältigter Höhe. Im Hinblick auf medikamentöse Maßnahmen wird sich jede geplante Expedition auch auf diese vorbereiten (Ausstattung, Medikamente, Schulung und ärztliche Begleitung)!**

**Ergänzung zu S. 1 unten-Flüge: Kranken, die schon unten Probleme mit der Sauerstoffversorgung haben (z. B. Krankheiten der Atmungsorgane), sollten vor Flügen den Arzt befragen. Gegebenenfalls muss eine zusätzliche Sauerstoff-Gabe im Flugzeug organisiert werden.**

