

Höhenakklimatisation
Höhentraining
Höhenkrankheit

Andreas Schmid
Medizinische Universitätsklinik Freiburg
Abt. Rehab. und Präv. Sportmedizin

Höhe und Sport

1. Physikalische Besonderheiten der Höhe
2. Akklimatisationsmechanismen des Menschen
3. Höhentraining
4. Höhenkrankheit

Definition Hypoxie

**Reduzierter Sauerstoffgehalt
(Sauerstoffpartialdruck)
in der Atemluft durch:**

- A) Reduzierung des Luftdrucks (hypobare Hypoxie)
- B) Reduzierung des relativen Sauerstoffanteils bei gleichem Luftdruck (normobare Hypoxie)

Hypoxieformen in der Praxis

- Natürliche Höhenbedingungen
- Künstliche Höhenbedingungen (z. B. Unterdruckkammer, Höhenhäuser)
- Gasgemische (abgeschlossene Kammer oder stationäres Maskensystem)
- Tragbare Atemmasken



Höhe und Sport – Natürliche Bedingung

Luftdruck

Wasserdampfdruck

Sauerstoffpartialdruck

Erdanziehungskraft

Lufttemperatur

Strahlungsintensität



Höhe und Sport



5300m – 8848m extreme Höhen

Todeszone ab 7000m

2500m – 5300m große Höhen

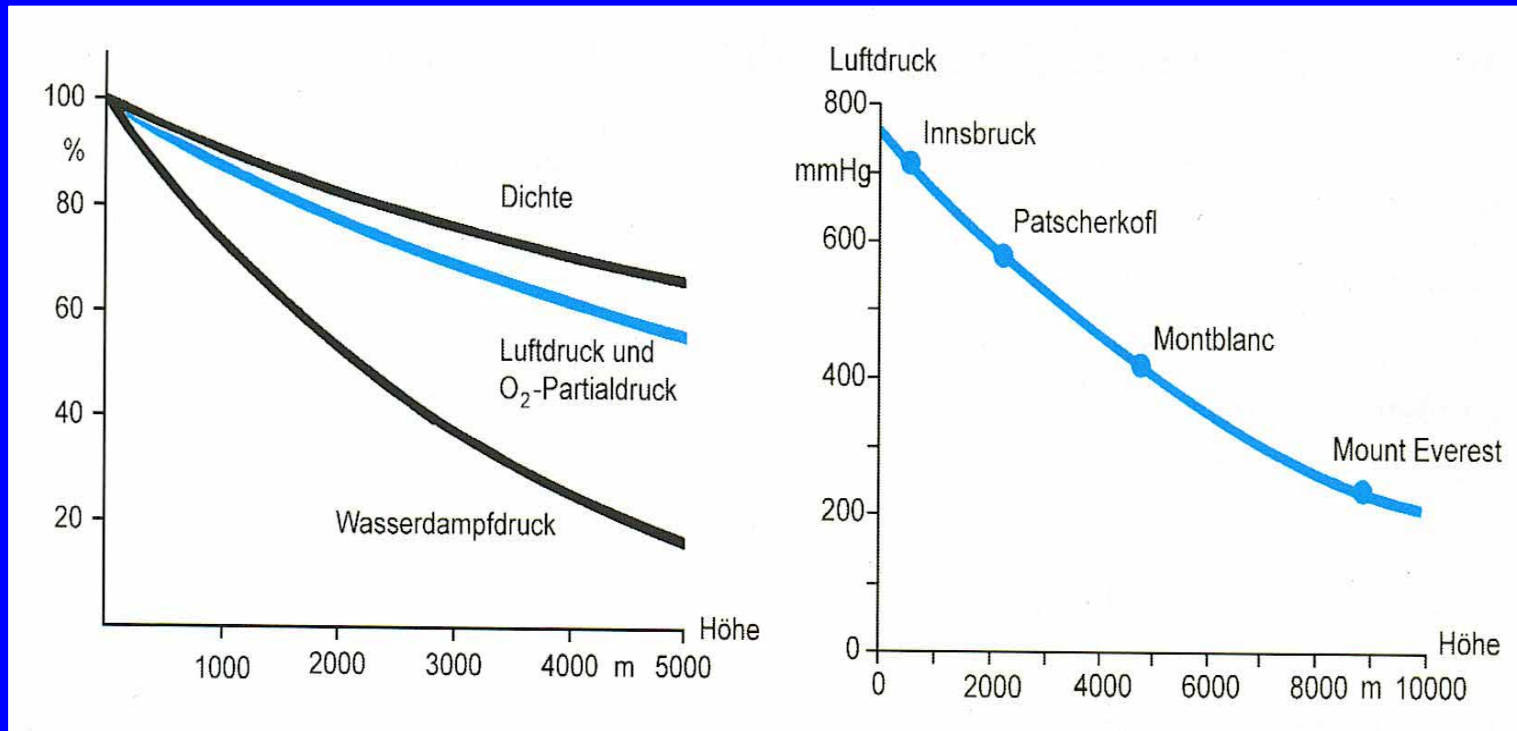
höchste Siedlung 5340m höchster Arbeitsplatz 6200m

1500m – 2500m mittlere Höhen

vollständige Kompensation möglich

Höhe und Sport

Luftdruck



Luftwiderstand geringer

-> entspricht Rückenwind von ca. 1,5 m/s

Wasserdampfdruck geringer

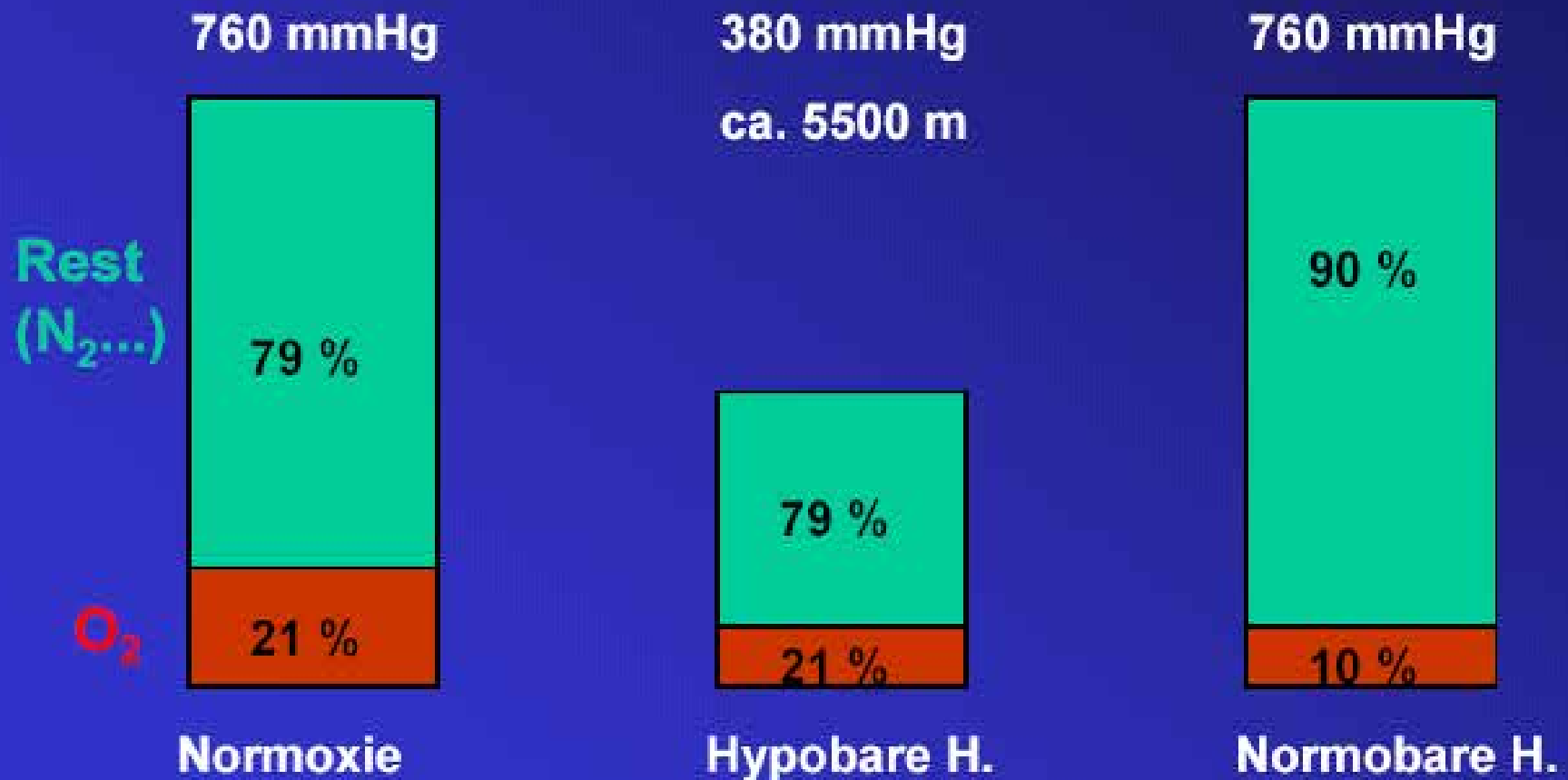
-> Vermehrter Flüssigkeitsbedarf

Physikalische Veränderungen bei Höhenexposition

- Luftdruck in Tallage (0 m) 760 mmHg (1013 hPa)
→ Sauerstoffpartialdruck $p_{\text{I}}\text{O}_2 = 160 \text{ mmHg (213 hPa)}$
- pro 100 Hm Abfall des Luftdrucks um ca. 1 %
→ in ca. 5500 m $p_{\text{I}}\text{O}_2 = 80 \text{ mmHg (106 hPa)}$
- Entspräche einem Sauerstoffanteil von ca. 10,5 % bei normobarer Hypoxie
- zusätzliche klimatische Veränderungen !!!

Hypoxie

Gesamtluftdruck



Höhe und Sport

Sauerstoffpartialdruck

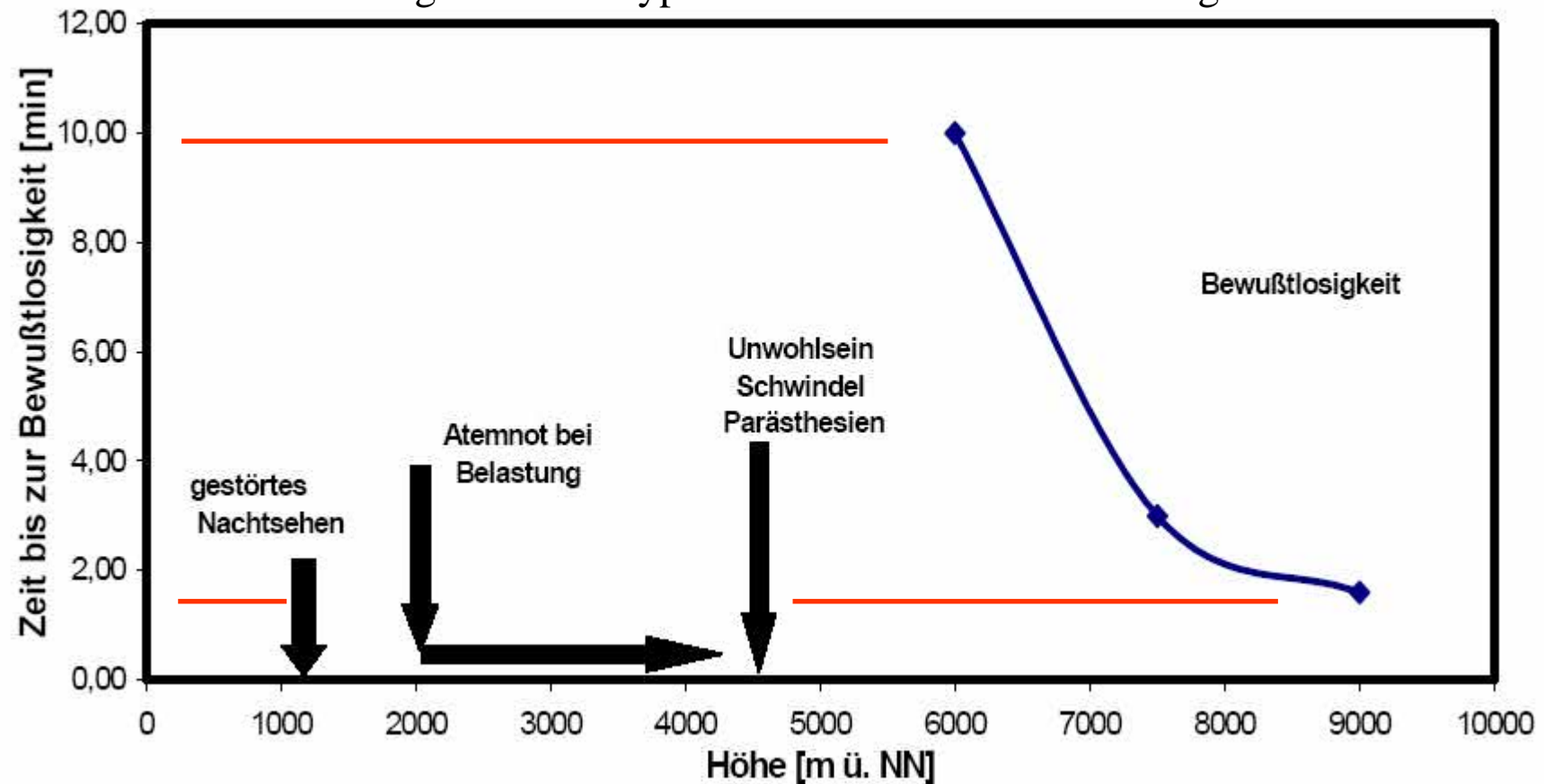
Höhe [m]	Luftdruck [mmHg]	O ₂ -Partialdruck [mmHg]	O ₂ -Partialdruck in Lunge [mmHg]	O ₂ % Normobare Hypoxie
0	760	149	104	21
2000	596	115	76	16,3
<u>4000</u>	<u>462</u>	<u>87</u>	<u>50</u>	<u>12,7</u>
6000	354	64	38	9,2
8000	267	46	32	6,3

$VO_{2\max}$ verringert sich ab 1500m um ca. 10%/1000m

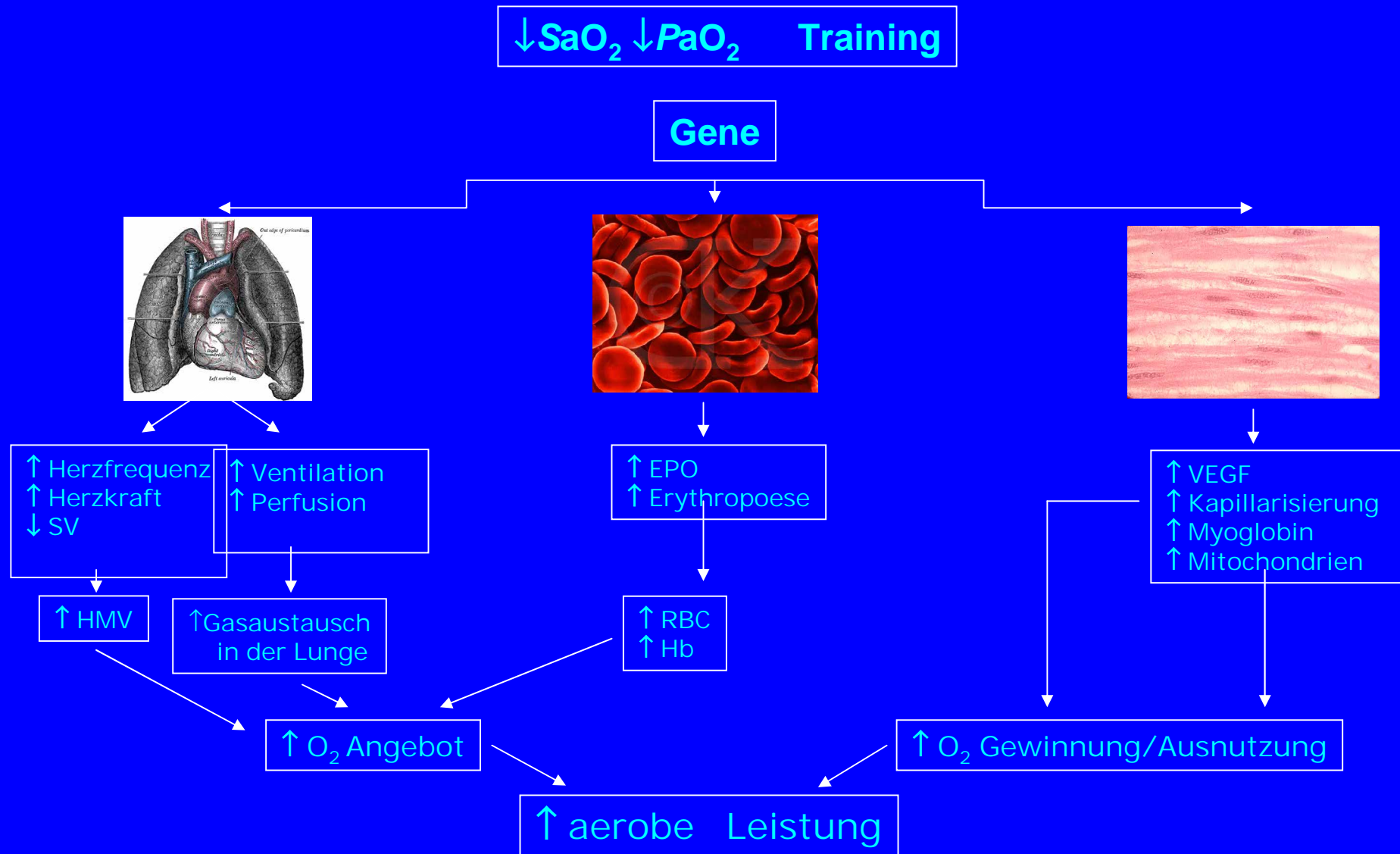
bei einer Höhe von 4000m entspricht das ca. 70 % der $VO_{2\max}$

Höhe und Sport

Auswirkungen akuter Hypoxie auf den menschlichen Organismus



Höhe und Sport - Hypoxieregelmechanismus



Höhe und Sport

akute Anpassung: **Steigerung des HMV** (Herz-Minuten-Volumen)
das Volumen an Blut, das pro Minute vom Herz gepumpt wird

Steigerung des AMV (Atem-Minuten-Volumen)
das Volumen an Luft, das pro Minute eingeatmet wird

Abnahme des Plasmavolumen

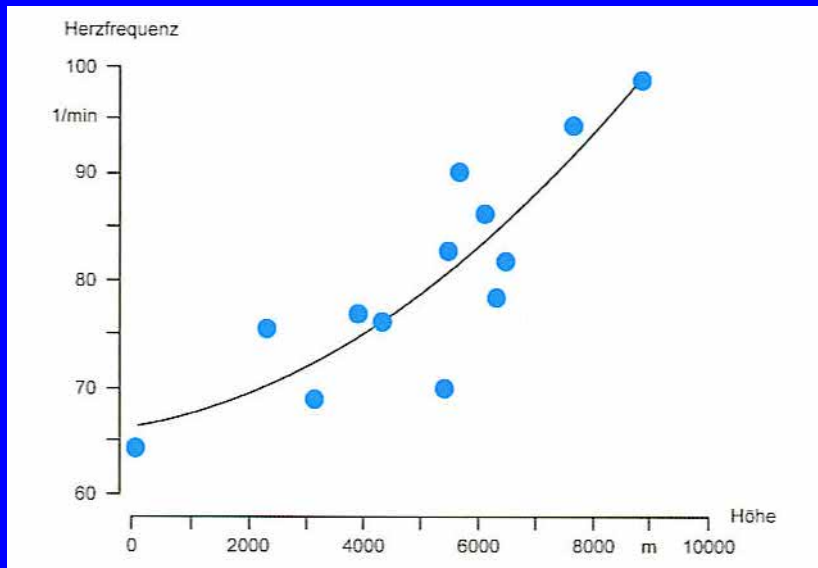
chronische Anpassung: **gesteigerte Erythropoese**
(Bildung und Entwicklung der Erythrozyten (rote Blutkörperchen))

Anpassung im Bereich des Muskels

(Steigerung des Myoglobingehaltes, Zunahme der Mitochondrien)

Höhe und Sport – Herz-Kreislauf

Ruheherzfrequenz



akute Hypoxie

HMV (Ruhe)



HMV (submaximal)



HMV (maximal)



chronische Hypoxie

HMV (Ruhe)



HMV (submaximal)

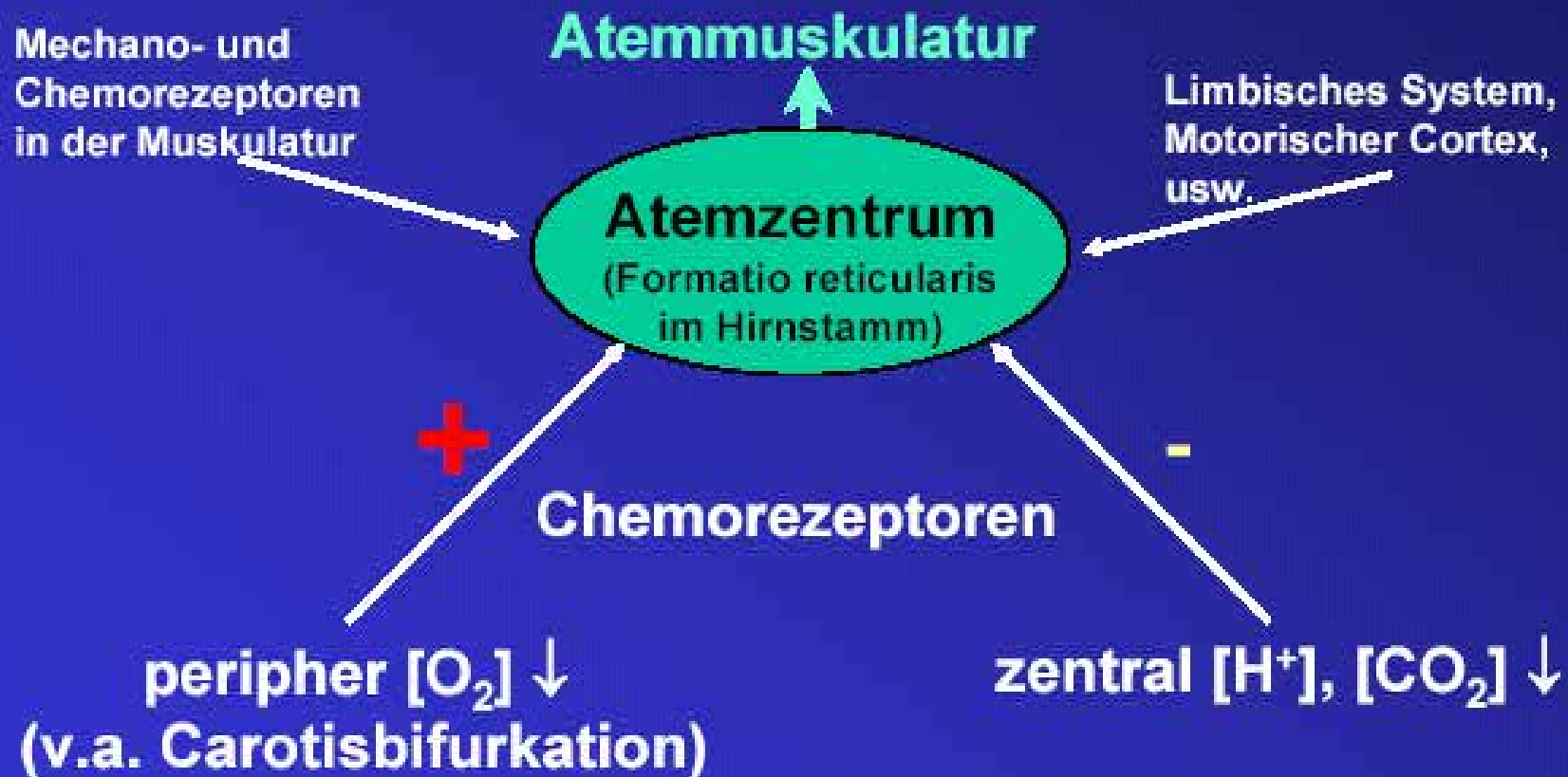


HMV (maximal)

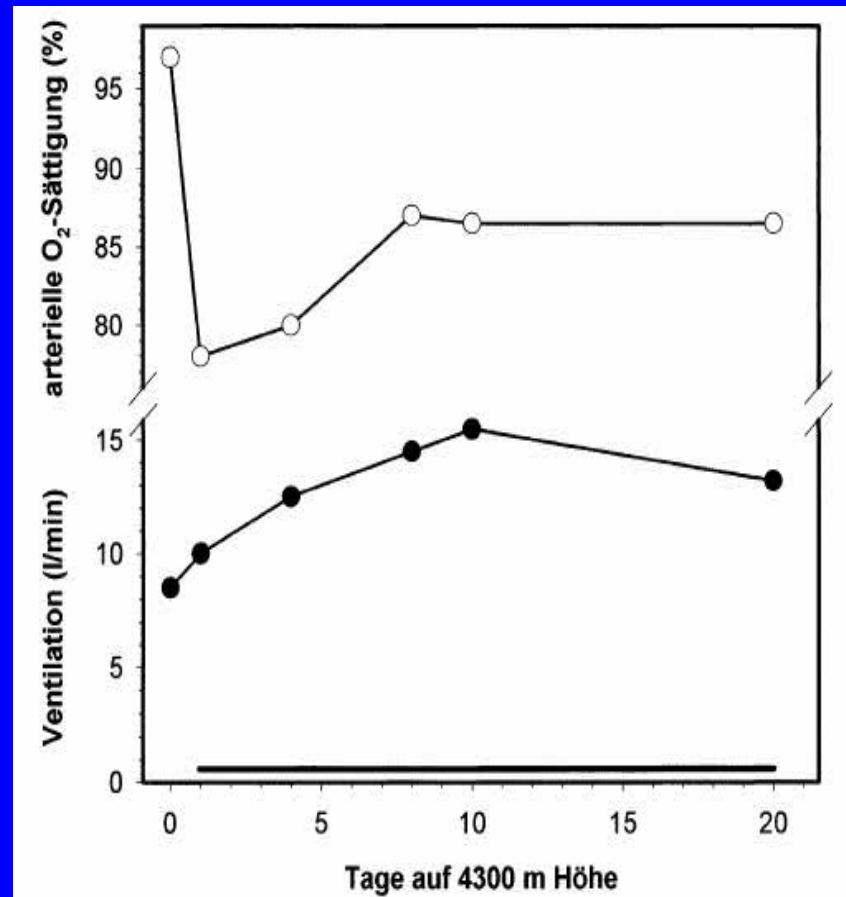


$$VO_{2 \max} \downarrow = HMV_{\max} \downarrow * \text{periphere } O_2\text{-Ausschöpfung}_{\max} \downarrow$$

Atmungsregulation unter akuter Hypoxie



Höhe und Sport – Atmung



Glomeruli, Nervenbündel im Bereich der Carotis, Aorta und im Hirnstamm messen:
O₂, CO₂ und pH des Blutes

Steigerung des Atemminutenvolumens

10-42 % moderate Höhen

100 % Mt. Everest

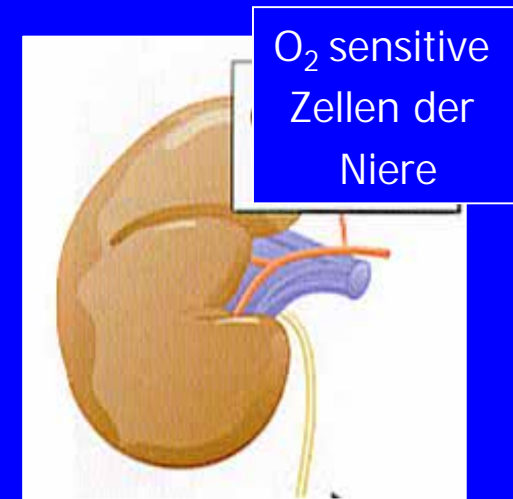
9 vermehrte Atemarbeit

9 vermehrter Wasserverlust

Höhe und Sport – Blut

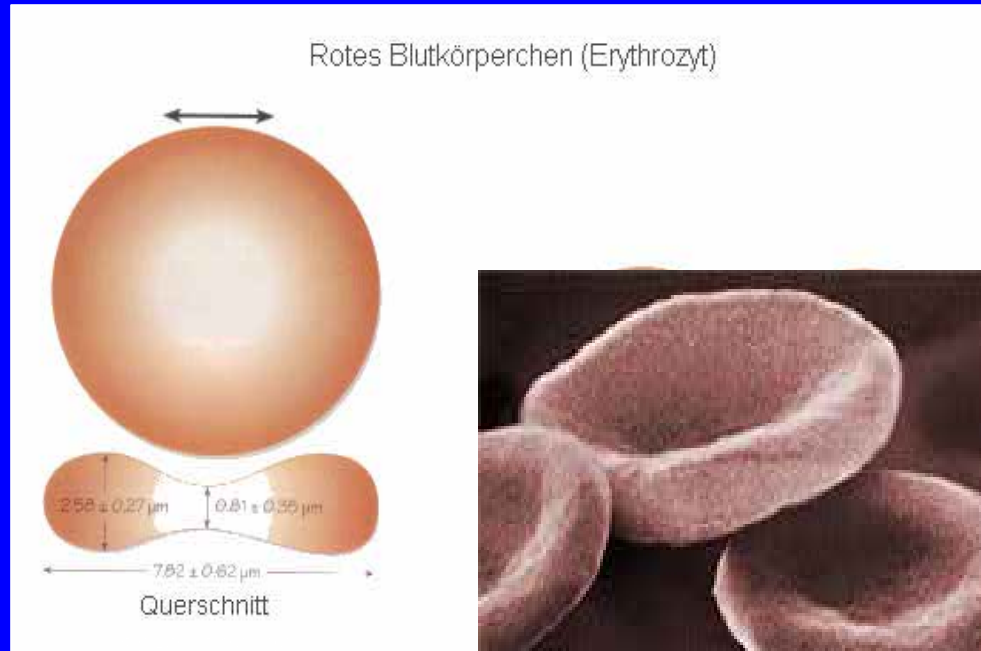
Verminderung des Blutvolumens durch gesteigerte Diurese

- 9 mehr Sauerstoffträger/ml Blut
keine Vermehrung der Erythrozyten
- 9 größerer Flüssigkeitsbedarf

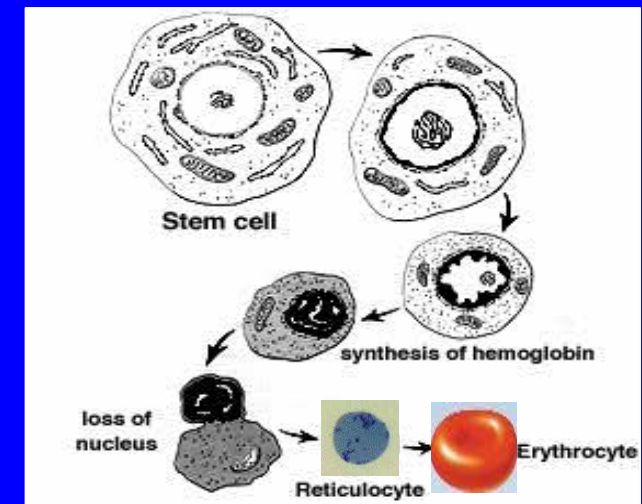


Schmidt Thews 2004

Höhe und Sport – Blut



Entstehung der Erythrozyten



- Erythrozyten sind kernlose Drops ähnliche Körper
- 9 größere Oberfläche
- Hämoglobin
- O_2 / CO_2 Transport
- Lebensdauer 120 Tage

Höhe und Sport – Muskulatur

vermehrte Kapillarisation

Vergrößerung der Mitochondrien

Neubildung von Glucosetransportern und

Vermehrung der Enzyme für aeroben und anaeroben
Stoffwechsel (?)

Gesteigerter Myoglobingehalt

Verminderung des Muskelquerschnitts

Grundüberlegungen des Höhentrainings

- Verbesserung der Leistungsfähigkeit bei Wettkämpfen in der Höhe durch Akklimatisation
- Verbesserung der Leistungsfähigkeit in Tallage durch:
 - Prozesse der Höhenakklimatisation
und / oder
 - zusätzlichen Trainingsreiz durch Hypoxie

Höhe und Sport – Atmung

Kontrolle der Tagesdaten

Datum		Kalender- woche	Schlaf [Stunden]	Körper- temperatur [°C]	Herz- frequenz [S/min]	Körper- gewicht [kg]	Trinkmenge [l]
Montag	12.06.2006	KW 24					
Dienstag	13.06.2006						
Mittwoch	14.06.2006						
Donnerstag	15.06.2006						
Freitag	16.06.2006						
Samstag	17.06.2006						
Sonntag	18.06.2005						

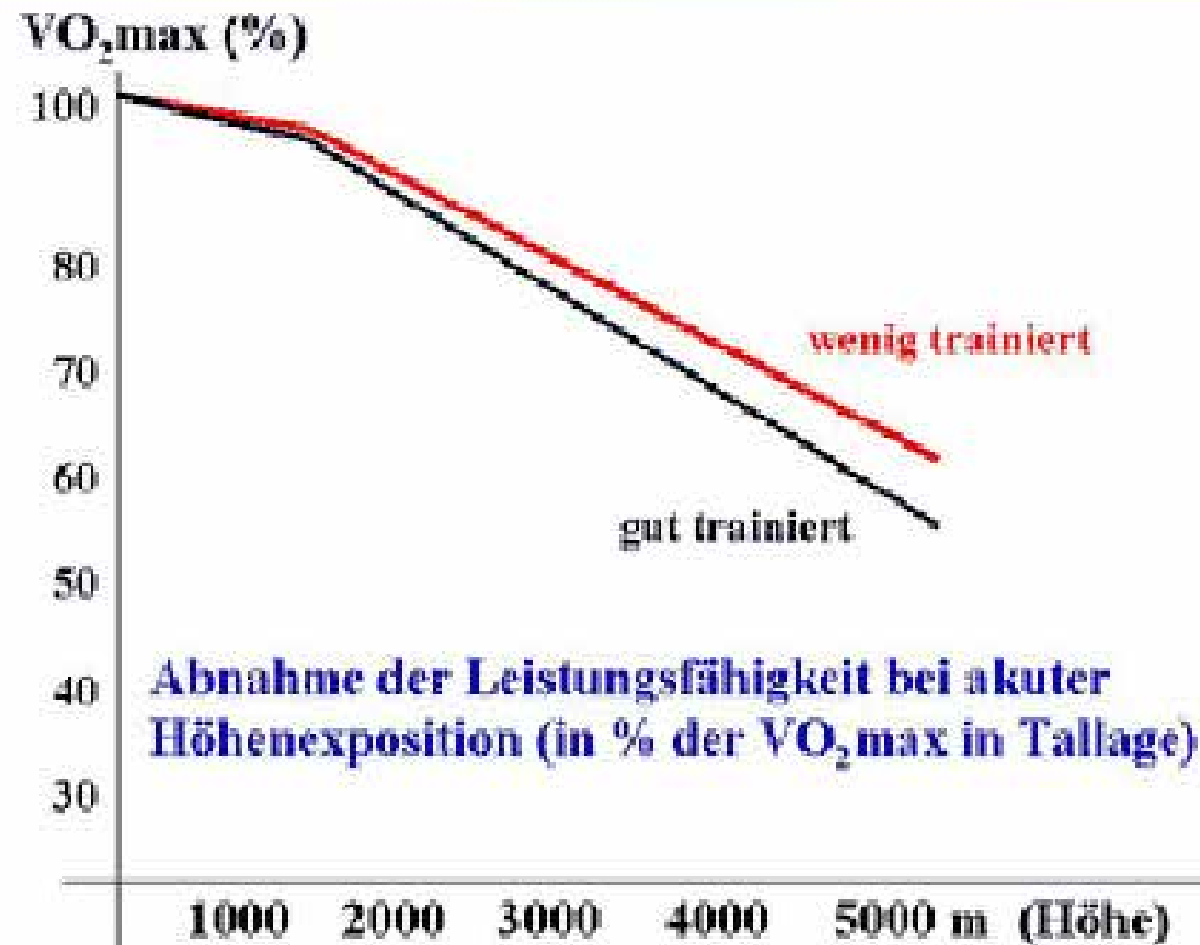
Zunahme der Herzfrequenz in den ersten vier Tagen um bis zu 20%
Normalisierung der Werte im weiteren Verlauf



Höhenakklimatisation

zur Verbesserung der
Leistungsfähigkeit in der
Höhe
(Wettkämpfe in der Höhe,
Expeditionen etc.)

Abnahme der Leistungsfähigkeit mit zunehmender Höhe




**„Höhentraining“
zur Verbesserung
der Leistungsfähigkeit
in Tallage**

Kombinationen von Hypoxie und Normoxie

- Living high - Training high
- Living high - Training low
- Living low - Training high

Live high – Train high

- Klassischer Ansatz
 - Verbesserung der VO_2max vor allem bei normal bis gut Trainierten
 - Systemische und muskuläre Anpassungen
 - Muskuläres Remodelling ?
- 

Live high – Train low

- RBCmass erhöht
→ Transportkapazität erhöht
- z. B. auf 2500 m wohnen,
auf 900 m trainieren für 4 Wochen
- VO_2max erhöht, Laufzeit im Feldtest
verbessert
- tendenziell Vorteile
- Responder - Nonresponder

Intermittierende Hypoxie (IHE)

- Variante von Live high – train low
- Relativ kurze Hypoxieaufenthalte
- Intermittierende Hypoxie auch 2-5 min.
Hypoxie, 2-5 min. Normoxie
- Anwendung zur Therapie von verschiedenen Erkrankungen
- Nur wenige Studien (ohne Kontrollgruppe)

Effekte intermittierender Hypoxie

- Erythropoiese ???
- Feldtestergebnisse ↑
- VO₂max ---
- Laufökonomie (↑?)
- Andere Sportarten ???
- + Hitze, + Krafttraining ???
- Individualität

Zusammenfassung 1

- „Probleme“ der wissenschaftlichen Absicherung:
 - Verbesserungen minimal
 - Problem der Studiengruppe
 - Vergleichbarkeit
 - **Interindividuelle Unterschiede !**
- Praxis ?

Zusammenfassung 2

- Es gibt kein allgemeines Erfolgsrezept
- Individuell nach:
 - Responder – Nonresponder
 - Einsatzbereich
 - Wettkampferfahrung des Athleten
 - event. Limitierungen

muss gearbeitet werden !

Höhe und Sport – Trainingsintensität

Kontrolle der Herzfrequenz

- Gleiche Herzfrequenz entspricht ca. einer gleichen relativen Belastung im Vergleich zum Flachland
- Generell nimmt die aerobe Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit vom Trainingszustand um ca. 10% je 1000m Höhendifferenz ab bei Leistungssportlern ab 600m bei weniger gut Trainierten ab 1500m

Höhe und Sport – Auswirkungen

Positive Auswirkung des Höhentrainings auf die aerobe Leistungsfähigkeit in der Höhe

Nicht eindeutig sind die Ergebnisse für die Auswirkungen auf die aerobe Leistungsfähigkeit im Flachland

Hochindividuelle Reaktion auf Höhentaining: Responder - Nonresponder

Höhe und Sport – Risiken

- Individuelle Reaktion auf das Höhentraining
- Thrombosegefahr: Hämatokrit#, weil Erythrozyten # und gesteigerter Wasserverlust
- Muskelumbauprozessen: Muskelproteinverlust

Höhe und Sport – Medizinische Gesichtspunkte

- Beginn ohne gesundheitliche Vorbelastung (Erkältung, Übertraining)
 - Check von Parametern des Eisenstoffwechsels, Blutbild, Vit B12, ev. Substituieren
- Erhöhten Flüssigkeitsbedarf beachten ca. 1l / 1000m Höhe
- Intensivere Sonneneinstrahlung berücksichtigen
- Auf schnell wechselndes Wetter achten
- größere Anfälligkeit für Erkrankungen, rascher Wechsel der Trainingskleidung, umsichtiger Umgang mit erkrankten Sportlern
- Anhaltende Übelkeit, Schlafstörungen und Kopfschmerzen können Zeichen einer Höhenunverträglichkeit sein- Rückkehr ins Flachland

Höhe und Sport – Trainingswissenschaftliche Gesichtspunkte

- Höhentrainingslager nicht zum ersten Mal vor wichtigen Wettkämpfen
- Trainingsaufbau :
 - ersten Woche mit geringer Intensität trainieren
 - zweite/dritte Woche Anhebung der Belastung
 - letzten Tage Drosselung der Intensität
 - längere Regenerationszeiten einplanen u.a. Physiotherapie, genügend Schlaf

Höhe und Sport – trainingswissenschaftliche Gesichtspunkte

- Höhentaining sinnvoll in den Jahresplan einbetten
 - geringe Trainingsintensität unmittelbar nach dem Höhentaining ca. eine Woche
 - größte aerobe Leistungsfähigkeit ca. 2-3 Wochen nach dem Höhentaining
- Individuell große Unterschiede bei der Reaktion auf das Höhentaining

Höhenkrankheit



- Akute Höhenkrankheit
- Hirnödem
- Lungenödem

Acute Mountain Sickness

- Unspezifische Symptome, subjektiv
- Kopfschmerzen bei nicht akklimatisierten Patienten über 2500müM und eines oder mehrere der folgenden Symptome
 - Gastrointestinale Symptome wie Anorexie, Nausea, Erbrechen
 - Schlaflosigkeit
 - Schwindel
 - Abgeschlagenheit, Müdigkeit
- Symptome treten nach ca. 6-10 Stunden in der Höhe auf

Höhenkrankheit - Reaktionen

Indifferenzzone (bis 2000müM)

- Physische und psychische Funktionen des Menschen werden praktisch nicht beeinflusst
- Sportliche und andere körperliche Höchstleistungen (Arbeit) sind daher kaum beeinträchtigt

Zone der vollständigen Kompensation (2000 bis 4000müM)

- Erhöhung von Herzfrequenz, Atemzeitvolumen, sowie vom Herzzeitvolumen (in Ruhe)
- Zusätzliche Bildung von Erythrozyten
- Physische und psychische Leistungsfähigkeit ist deutlich reduziert

Zone der unvollständigen Kompensation (4000-7000müM)

Ohne Akklimatisation erfolgen erheblichen Störungen

Physische und psychische Leistungsfähigkeit ist erheblich reduziert

Entscheidungs- und Reaktionsfähigkeiten nehmen teilweise erheblich ab

Kritische Zone (ab 7000müM) - Todeszone

Sauerstoffpartialdruck < 30-35 mm Hg

Diffusion des Sauerstoffes von der Lunge ins Blut und vom Blut in die Zellen nicht mehr möglich

Rasch können lebensbedrohlichen Reaktionen eintreten

Extreme individuelle Unterschiede

Pathogenese

Entstehung unvollständig verstanden, wahrscheinlich durch Abänderung der normale Reaktionen auf Hypoxämie und Hypobarie

- Vermehrte Ventilation mit respiratorischer Alkalose
- Vermehrung des cerebralen Blutflusses und des pulmonalarteriellen Druckes
- Veränderungen in den Carotiskörperchen auf Neurotransmitter
- Freisetzung von Atrial Natriuretic Peptide aus dem Herzen
- Säure-Base-Shift ins ZNS
- Endothel-Zell-Schaden mit vermehrter kapillärer Permeabilität und Freisetzung von Mediatoren
- Genetische Disposition (Clearance Alveolarraum)

Risikofaktoren

- + Fehlende Akklimatisation
- + Frühere Höhenkrankheit
- + Grosse Anstrengung
- + <50 Jahre
- + Leben auf <900müM
- + Uebergewicht
- + Geschlecht (Frauen sollen weniger häufig an Höhenlungenödem leiden)

Keinen Einfluss auf die Entwicklung einer Höhenkrankheit haben

Fitness

Arterielle Hypertonie

KHK

COPD

Diabetes

Schwangerschaft

Unterschiedliche Interaktionen zwischen genetischen Faktoren und Umweltfaktoren erklären wahrscheinlich die individuellen Unterschiede

Akklimatisierung

- Ueber 3500müM langsamer Aufstieg
 - Schlafhöhe pro Tag nicht mehr als 300m (-700m) erhöhen
 - Eine Woche auf 3500müM verbringen, bevor eine Schlafhöhe von mehr als 5000müM gewählt wird
 - Genügend Flüssigkeitsaufnahme
 - Kälteschutz
-
- Basislager (mehrere Wochen) auf bis 6000müM ist möglich
 - Bei guter Akklimatisation AZ gut
 - Bei Anstrengung Dyspnoe

Höhen-Hirn-Oedem

- Ataxie
- Verändertes Bewusstsein
- Schläfrigkeit und Stupor
- Klinisch eventuell
 - Papillenödem
 - Retinablutungen
 - Hirnnervenlähmungen
- Entwicklung über mehrere Stunden bis Tage
- Tod (Herniation)

Höhen-Lungen-Oedem

- Vorkommen: nach 1-3 Tagen auf einer neuen Höhe
- Trockener Husten
- Eventuell blutiges Sputum
- Ausgeprägte Tachykardie und Tachypnoe
- Fieber
- Rasselgeräusche
- Radiologisch fleckige Infiltrate
- EKG Sinustachykardie, RSB, P-Wellenabnormitäten
- pO_2 30-40mmHg

Grundsätzliche Therapie

- Körperliche Ruhe
- Wärme
- Bewusste Hyperventilation
- Aufrechte Lage
- Flüssigkeitszufuhr
- **Abstieg / Abtransport**

Therapie

Höhenkrankheit / Höhen-Hirn-Oedem

- **Ausruhen**
- **Flüssigkeitsgabe**
- **Analgesie (Paracetamol, NSAR)**
- **Bei fehlender Besserung**
 - **Abstieg**
 - **Acetazolamide (Diamox®)**
 - 250 – 500mg alle 12 Stunden
 - Therapiebeginn 24 - 48 Stunden vor Aufstieg und bis 48 Stunden nach Ankunft in der Höhe
 - Acetazolamide vermindert den alveolären arteriellen Sauerstoffgradient
 - Auch als Prophylaxe
 - **Dexamethason (Fortecortin®)**
 - 4mg alle 6 Stunden
 - Auch als Prophylaxe



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

