

Peter Bärtsch

Höhenanpassung

Abt. Sportmedizin der Medizinischen Klinik und Poliklinik, Universitätsklinikum Heidelberg

Wer mit der Bahn auf das Jungfraujoch fährt (3450 m), wird dort schnell feststellen, dass bereits geringe körperliche Belastungen mit deutlich höherer Atem- und Herzfrequenz einhergehen und, im Vergleich zum Tiefland, als anstrengender empfunden werden. Der Leistungsverlust in der Höhe wird messbar ab einer Höhe von 1500 m und beträgt als Faustregel pro 100 m über 1500 m ca. 1 % Reduktion der maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2max}$). Bei hoch trainierten Athleten beginnt der Leistungsabfall schon in Höhen ab 1000 m. In Höhen ab 3000 m wird die Leistungseinbuße auch bei geringeren Belastungen im Alltag spürbar. Wer sich über mehrere Tage bis Wochen in der Forschungsstation des Jungfraujochs aufhält, wird die Leistungseinschränkung durch die Höhe im Alltag nicht mehr registrieren. Dank Höhenakklimatisation ist es sogar möglich, dass Bergsteiger nach mehrwöchigem langsamen Aufstieg in der Lage sind, wenn auch nur unter größter Anstrengung, 8000er ohne zusätzlichen Sauerstoff zu besteigen, während eine akute Exposition in einer Unterdruckkammer auf der gleichen simulierten Höhe innerhalb von ca. 15 min ohne zusätzlichen Sauerstoff zur Bewusstlosigkeit führt.

In diesem Beitrag sollen die wichtigsten Mechanismen der Höhenakklimatisation besprochen werden. Bei akuter Exposition kompensieren wir die Beeinträchtigung der Sauerstoffversorgung als Folge des reduzierten O_2 -Partialdruckes durch Steigerung der Ventilation und Zunahme des Herzminutenvolumens (Herzfrequenz). Bei anhaltender Hypoxie werden weitere Anpassungsvorgänge ausgelöst, die letztlich alle in einer Verbesserung des O_2 -Gehaltes des zirkulierenden Blutes resultieren. Die Wirkung dieser Mechanismen setzt zeitlich gestaffelt ein. Nach wenigen Stunden beginnt eine Hämokonzentration, in den ersten Tagen kommt es ferner zur ventilatorischen Akklimatisation, während die Steigerung der Erythropoese erst ab etwa der 3. Woche ins Gewicht fällt. Weitere Anpassungsvorgänge, die das kardiovaskuläre System und die Muskulatur betreffen, können im Rahmen dieser kurzen Übersicht nicht besprochen werden.

Abnahme des Plasmavolumens

Unter kontrollierten Laborbedingungen lässt sich gut zeigen, dass das Plasmavolumen in Hypoxie wegen einer Zunahme der Diurese, die auch Höhendurese genannt wird, abnimmt. Diese „Eindickung“ führt zu einer Zunahme der Sauerstofftransportkapazität pro Volumeneinheit Blut. Änderungen der Nierendurchblutung, Hypokapnie, Hyperventilation und hormonale Veränderungen kommen als Ursache der Höhendurese in Frage (5). In Feldstudien ist der Nachweis der Höhendurese oft schwierig, weil unter Belastung zusätzlich vermehrt Flüssigkeit über Atmung und Schwitzen verloren

wird und weil Bergkrankheit in der Regel mit Flüssigkeitsretention einhergeht (Abb. 1). Wichtig ist zu realisieren, dass der initiale Hämoglobinanstieg während eines Höhenaufenthaltes nichts mit gesteigerter Erythropoese zu tun hat.

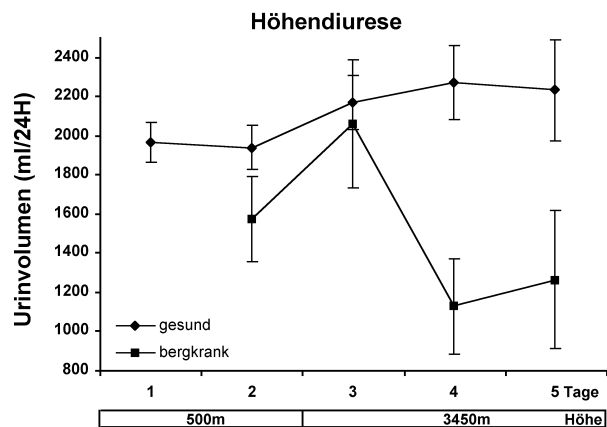


Abbildung 1: Stämpfli verwendete meines Wissens in der Literatur erstmals den Begriff Höhendurese für die gesteigerte Diurese von 4 Probanden, die mit der Bahn auf das Jungfraujoch transportiert worden waren. Interessanterweise zeigten 4 Personen, die bergkrank wurden, eine Abnahme der Diurese (Abb. erstellt nach Daten von Stämpfli R., Eberle A., *Helv. Physiol. Acta* 1944; Suppl. III: 221-232, Mittelwerte \pm Standardfehler).

Ventilatorische Akklimatisation

In den ersten 2 Wochen kommt es in einer gegebenen Höhe zu einer deutlichen weiteren Steigerung der Atmung. PCO_2 , als Indikator der Ventilation, fällt z. B. in einer Höhe von 4500 m über 2 Wochen um weitere 5 - 7 Torr, während die SaO_2 in dieser Zeit um 10 % ansteigt (2). Interessanterweise spielt sich der Großteil dieser ventilatorischen Akklimatisation während der ersten 2 - 3 Tage ab (Abb. 2), d. h. in einem Zeitraum, in dem normalerweise die Symptome der Bergkrankheit verschwinden. Neue Untersuchungen zeigen, dass diese zusätzliche Steigerung der Atmung durch eine Zunahme der Empfindlichkeit der Chemorezeptoren im Glomus caroticum auf Hypoxämie zurückzuführen sind, während der vermehrten Bicarbonatausscheidung im Urin zur Kompensation der respiratorischen Alkalose eine geringe Bedeutung zukommt (3). Eine zusätzliche Steigerung der renalen Bicarbonatausscheidung durch Diamox ist jedoch sehr wirksam. Sie führt zu einer weiteren Zunahme der Ventilation, verbessert die Sauerstoffsättigung und kann Symptome der Bergkrankheit verhindern (1). Ventilatorische Akklimatisation führt zu einer Verbesserung der Sauerstoffversorgung, indem sie über eine Zunahme des PO_2 in den Alveolen zu einer besseren Aufsättigung des Hämoglobins führt.

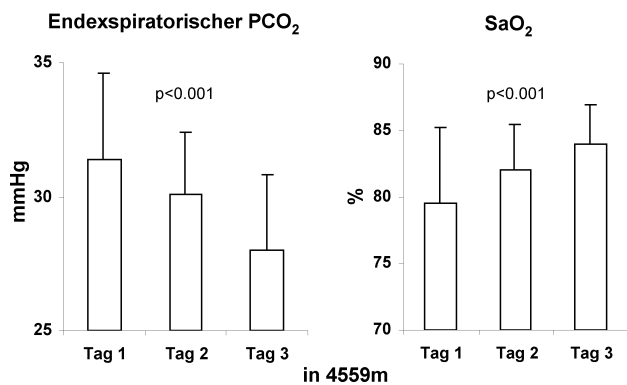


Abbildung 2: Ventilatorische Akklimation: In den ersten 3 Tagen kommt es in 4559 m Höhe bei beschwerdefreien Bergsteigern zu einer signifikanten Zunahme der Ventilation (Abnahme des endexpiratorischen PCO₂ um 3,4 mmHg) und zu einer Zunahme der arteriellen O₂-Sättigung (SaO₂) um 4,4 %. Mittelwerte ± SD von 12 Probanden.

Gesteigerte Erythropoese

Am 1. bis 2. Tag einer Höhenexposition kommt es zum maximalen Anstieg des Erythropoietins, das dann rasch wieder abfällt und sich auf nur leicht erhöhten Werten (im Vergleich zum Tiefland) stabilisiert. Nach einigen Tagen finden sich als Ausdruck der gesteigerten Erythropoese Retikulozyten im peripheren Blut, nach ca. 2 Wochen lässt sich ein signifikanter Anstieg der Erythrozyten bzw. des Hämoglobins nachweisen. Die wenigen Studien, die die gesamte Erythrozytenmasse direkt mittels Markierung oder indirekt über das Plasmavolumen gemessen haben, zeigen, dass es beim klassischen Höhentraining zu einer signifikanten Zunahme kommt nach 4 Wochen in 2500 – 2800 m, während 3 Wochen in Höhen bis zu 2300 m nicht zu signifikanten Änderungen führten (4).

Als Folge der Zunahme junger Erythrozyten, welche einen erhöhten Gehalt an 2,3-DPG aufweisen, und wegen einer Steigerung der 2,3-DPG-Synthese in allen Erythrozyten kommt es zu einer verminderten Sauerstoffaffinität des Hämoglobins, was die Abgabe von Sauerstoff an das Gewebe erleichtert. Dieser Effekt wird aber in Höhen ab 5000 m überspielt durch eine ausgeprägte, nicht kompensierbare respiratorische Alkalose, welche die Sauerstoffaffinität des Hämoglobins erhöht. Dies begünstigt die Beladung mit Sauerstoff in der Lunge, wogegen die Abgabe in der Peripherie erschwert wird. In 4000 m halten sich diese Effekte in etwa die Waage, so dass es unter dem Strich zu keiner Verschiebung der HbO₂-Dissoziationskurve kommt. Insgesamt ist die Veränderung der Sauerstoffaffinität des Hämoglobins, im Vergleich zu den anderen Mechanismen, für die Akklimation wahrscheinlich von untergeordneter Bedeutung.

Bedeutung für den Leistungssportler

- Hämoglobinanstieg im Höhentraining ist nicht gleichbedeutend mit mengenmäßiger Zunahme des Hämoglobins. Es kann sich um einen vorübergehenden Konzentrierungseffekt handeln, der nach Rückkehr ins Tiefland schnell wieder verschwindet.

- Die üblicherweise durchgeführten Höhentrainings (Höhe etwa 2000 m, Dauer etwa 2-3 Wochen) führen nicht zu einer relevanten Hämoglobinvermehrung.
- Die Akklimationsvorgänge verbessern die Ausdauerleistungsfähigkeit, weshalb für Wettkämpfe in der Höhe unbedingt ein vorheriger Akklimationsaufenthalt nötig ist.

Bedeutung für den Bergsportler

Symptome der akuten Höhenkrankheiten (akute Bergkrankheit, Höhenlungenödem) sind auf eine ungenügende Akklimation zurückzuführen. Die Aufstiegs geschwindigkeit soll so festgelegt werden, dass es zu keinen wesentlichen Symptomen kommt. Wegen großer individueller Unterschiede kann keine einheitliche Regel aufgestellt werden. Unsere Untersuchungen zeigen, dass auch besonders anfällige Personen bei einer durchschnittlichen Aufstiegs geschwindigkeit von 300 – 400 m/Tag ab einer Höhe von 2000 m Höhen bis 7000 m weitgehend symptomfrei bleiben (1).

Bedeutung für Patienten mit kardiovaskulären Erkrankungen

- Auch Menschen über 65 Jahre mit und ohne chronische Krankheiten zeigen in der Regel eine normale Höhenakklimation
- Höhenlagen der Kurorte und Ausflugsziele in den Alpen (1500 – 2500 m) sind in der Regel unproblematisch, weil die zusätzliche Belastung durch den geringen Leistungsverlust von ca. 5 – 10 % kaum ins Gewicht fällt
- In den ersten 2 – 3 Tagen eines Höheng Aufenthaltes (Zeit, in der die Hämokonzentration und die ventilatorische Akklimation greifen), soll körperliche Schonung empfohlen werden, insbesondere für Patienten mit vorbestehenden Krankheiten oder Personen mit erhöhter Anfälligkeit für akute Höhenkrankheiten.

Literatur

1. Bärtsch, P.: Aktuelle Aspekte der Höhenmedizin. Sportorthopädie – Sporttraumatologie 13 (1997) 77 – 80
2. Bender, P. R., R. E. McCullough, R. G. McCullough, S. Huang, P. D. Wagner, A. Camerman, A. J. Hamilton, J. T. Reeves: Increased exercise SaO₂ independent of ventilatory acclimatization at 4,300 m. J. Appl. Physiol. 66 (1989) 2733–2738
3. Bisgard, G. E., M. A. Busch, H. V. Forster: Ventilatory acclimatization to hypoxia is not dependent on cerebral hypocapnic alkalosis. J. Appl. Physiol. 60 (1986) 1011–1015
4. Friedmann, B., P. Bärtsch: Möglichkeiten und Grenzen des Höhentrainings im Ausdauersport. Leistungssport 3 (1999) 43–48
5. Hildebrandt, W., A. Ottenbacher, M., Schuster, E. Swenson, P. Bärtsch: Diuretic effect of hypoxia, hypocapnia, and hyperpnea in humans: relation to hormones and O₂ chemosensitivity. J. Appl. Physiol. 88 (2000) 599–610

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. med. P. Bärtsch

Universitätsklinikum, Medizinische Klinik und Poliklinik

Abt. Sportmedizin, Hospitalstr. 3, 69115 Heidelberg

e-mail: peter_bartsch@med.uni-heidelberg.de