



# JAHRBUCH '95

ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT  
FÜR ALPIN- UND HÖHENMEDIZIN

THEMA:

## SPORTMEDIZIN, SPORTWISSENSCHAFTEN UND BERGSPORT

HERAUSGEBER:

E. JENNY  
W. SCHOBERSBERGER  
E. RAAS  
G. FLORA

# IMPRESSUM

Herausgeber:

Jenny E., Prof. Dr. med., Präsident der Österreichischen Gesellschaft für Alpin- und Höhenmedizin, Mitterhoferstraße 10a, A-6020 Innsbruck

Schobersberger W., Univ.-Ass. Dr. med., Univ.-Klinik für Anästhesie und Allg. Intensivmedizin, Anichstraße 35, A-6020 Innsbruck

Raas E., Univ.-Prof. Dr. med., Institut für Sport- und Kreislaufmedizin, Anichstraße 35, A-6020 Innsbruck

Flora G., Univ.-Prof. Dr. med., I. Univ.-Klinik für Chirurgie, Abteilung für Gefäßchirurgie, Anichstraße 35, A-6020 Innsbruck

Verleger:

Österreichische Gesellschaft für Alpin- und Höhenmedizin

Satz, Gestaltung und Druck:

OK-Druck Schreithofer Ges.m.b.H., Hunoldstraße 12, A-6020 Innsbruck

Alle Rechte vorbehalten

Umschlagbild:

Heinz Zak in seiner Route "Leben im Sonnenschein" 9/9+,  
Schüsselkar/Wetterstein  
Foto: Angelika Zak

---

## *Langfristige Höhenanpassung in den Bolivianischen Anden*

*Chronic high altitude adaptation in the Bolivian Andes*

### SUMMARY

The present report gives basic facts on geography, population and history of the Andean region of Bolivia. Based on research carried out at the Instituto Boliviano de Biología de Altura (I.B.B.A.), Universidad Mayor de San Andrés, in La Paz, the main features of long term adaptation to high altitude either by birth and continuous residence or early migration are reported. Altitude hypoxia has a small or no effect at all on longitudinal growth. Total lung capacity is increased mainly by increase of residual volume and secondly by increase of vital capacity. Highland Aymara have an accelerated growth of thorax dimensions and lung function as compared to high-altitude natives of European ancestry. Development of European girls born at high altitude is delayed by about 0.8 years, whereas growth and development of prepubertal boys of low socio-economic level is delayed by 2 years at high altitude as well as in the lowlands. Other features like blunted respiratory drive, increased diffusing capacity, increase of P50, of pulmonary artery pressure and hemoglobin concentration are also described as well as the effect of high altitude hypoxia on the right ventricle in infants. With respect to work capacity expressed as maximal oxygen consumption ( $VO_2$  max), a decrease of 11–15 % is seen in children compared to similar sea level children. Adolescent boys of Aymara ancestry and of European ancestry have similar  $VO_2$  max's. Finally, high altitude natives increase their  $VO_2$  max less when inhaling additional  $O_2$  than acclimatized sea level natives. With a training program used at lowland in lowland subjects, high altitude natives increase their  $VO_2$  max in the same degree, additional oxygen does not bring a greater increase of  $VO_2$  max. Maximal lactate concentrations are similar at high and low altitude, but high altitude natives trained in normoxia show a decreased buffer capacity.

Eventhough patterns of long term high altitude adaptation are not completely clear yet, it seems to be partly genetically determined and partly by adaptation during growth and development (developmental adaptation).

*Keywords:* Chronic altitude exposure, children, exercise performance, hypoxia.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit beschreibt Geographie, Bevölkerung und Geschichte der bolivianischen Andenregion. Weiters werden auf Grund von Forschungsarbeiten des Instituto Boliviano de Biología de Altura (Bolivianisches Institut für Höhenbiologie, I.B.B.A.), Universidad Mayor de San Andrés in La Paz, die wichtigsten Merkmale der langfristigen Höhenanpassung aufgezeigt, sei es Anpassung durch Geburt und permanente Residenz oder frühe Migration. Höhenhypoxie hat einen geringen oder gar keinen Einfluß auf das Längenwachstum. Die Totalkapazität der Lunge ist vergrößert, hauptsächlich durch Vergrößerung des Residualvolumens, an zweiter Stelle der Vitalkapazität. Hochland Aymara weisen ein beschleunigtes Wachstum der Thoraxdimensionen und der Lungenfunktionen auf im Vergleich zu in der Höhe geborenen Europäern. Die Entwicklung in der Höhe geborener europäischer Mädchen ist um rund 0,8 Jahre verzögert, während Wachstum und Entwicklung von Jungen im Vorpubertätsstadium mit niedrigem sozio-ökonomischen Status um 2 Jahre verzögert ist, sowohl in der Höhe als auch im Tiefland. Andere Merkmale langfristiger Höhenanpassung werden ebenfalls beschrieben, nämlich verminderter Atmungsantrieb, vermehrte Diffusionskapazität, Erhöhung des P50, des Drucks in der Lungenarterie und der Hämoglobinkonzentration. Außerdem wird die Wirkung der Höhenhypoxie auf die Muskulatur des rechten Ventrikels bei Neugeborenen und Kleinkindern beschrieben. Was die Arbeitskapazität betrifft in Form des maximalen Sauerstoffverbrauches ( $VO_2 \text{ max}$ ) so wird bei Kindern eine Verminderung von 11–15 % beschrieben im Vergleich zu gleichaltrigen Kindern im Tiefland. Aymara-stämmige Kinder und Jugendliche sowie Kinder und Jugendliche europäischer Abstammung zeigen einen ähnlichen  $VO_2 \text{ max}$ . Schließlich vermehren Höhenbewohner ihren  $VO_2 \text{ max}$  weniger mit zusätzlichem Sauerstoff als es akklimatisierte Tieflandbewohner tun. Mit einem Trainingsprogramm, das im Tiefland bei Tieflandbewohnern angewandt wurde, vermehren die Höhenbewohner ihren  $VO_2 \text{ max}$  in der gleichen Weise. Zusätz-

licher Sauerstoff beim Training bringt keine größere Vermehrung des  $VO_2$  max. Maximale Laktatkonzentrationen sind ähnlich in der Höhe und im Tiefland, jedoch Hochlandbewohner, die mit zusätzlichem Sauerstoff trainieren, zeigen eine verminderte Pufferkapazität des Blutes. Wenn auch die Wege der langfristigen Höhenanpassung noch nicht völlig geklärt sind, so sprechen zahlreiche Merkmale für eine genetische Bestimmung und andere für Anpassung während der Zeit des Wachstums und der Entwicklung.

*Schlüsselwörter:* Chronische Höhenanpassung, Hypoxie, Kinder, Leistungsfähigkeit.

## EINLEITUNG

Die zentrale Andenregion wird in drei Gebiete eingeteilt: Ein westliches Gebirgssystem (Cordillera Occidental), das parallel zur südamerikanischen Küste verläuft, eine breite Hochebene (Durchschnittshöhe 4000 m), die sich von der Mitte Perus über den Osten Boliviens bis in das nördliche Chile erstreckt (Altiplano) und eine östliche Gebirgskette (Cordillera Oriental), die den Altiplano vom Amazonasbecken trennt. Die höchsten Berggipfel in Bolivien befinden sich zwischen 6000 und 7000 Metern.

Die frühesten Zeichen von menschlicher Gegenwart in der Andenregion stammen von archäologischen Funden in einer Höhle bei Ayacucho, Peru (2900 m). Die letzte Schicht vor der untersten in dieser Höhle wurde auf 20.000 Jahre vor unserer Gegenwart datiert (42). Die präinkaischen Zivilisationen bestanden aus einer Reihe von Kulturen, die sich bis zu den Imperien von Huari und Tiahuanacu (9. Jahrhundert A.D.) hauptsächlich entlang der Küste entwickelten. Tiahuanacu, ein wichtiges Kultzentrum auf dem heute bolivianischen Altiplano gelegen, besaß eine Einflußsphäre, die sich vom Titicacabecken nach Süden bis zur chilenischen Küste erstreckte (53). Um 1000 A.D. wurden Tiahuanacu und Huari jedoch verlassen und verschwanden. Den größten Einfluß danach und besonders in den letzten 100 Jahren vor der spanischen Eroberung (1532) erreichte das Inkaimperium, das sich vom Norden Ecuadors bis zur Mitte Chiles erstreckte und in seiner Blütezeit zwischen 6 und 30 Millionen Menschen umfaßte. Zur Zeit der spanischen Invasion herrschte jedoch Bürgerkrieg im Inkareich wegen der umstrittenen Nachfolge der beiden Brüder Huascar y Atahuallpa. Diese Lage wurde von den Spaniern ausgenutzt und ermöglichte die Eroberung des von den Inkas verwalteten Gebietes in den beiden darauffolgenden Jahren. Die Spanier wurden jedoch bei ihrem Vordringen beträchtlich



behindert, einerseits wegen der Unwirtlichkeit des Landes, aber auch, und nicht zuletzt, wegen der Höhe, in welcher sie sich fortbewegen mußten. Die Wirkung der Höhe wurde zum erstenmal im Jahre 1569 von dem spanischen Jesuitenpater José de Acosta beschrieben in seinem Buch "Historia Natural y Moral de las Indias". Er berichtet von einem tödlichen, befremdlichen Syndrom von Atembeschwerden, Schwindel, Erbrechen, Ohnmacht, welches er sehr richtig mit der Tatsache in Verbindung brachte, daß in großer Höhe "die Elemente der Luft so dünn und delikate sind, daß diese zum menschlichen Atmen nicht geeignet ist."

Bei ihrer Eroberung der Andenregion trafen die Spanier auf die Ureinwohner, welche sich aus drei großen Gruppen zusammensetzten, die von J.A. Vellard (52) "Laguiden", "Altiplaniden" und "Andiden" genannt wurden. Die Laguiden umfassen die drei Gruppen Urus, Pukinas und Chipayas, die man heute noch unter den Aymara Fischern des Titicacasees antrifft und die auch unter dem Begriff "Paleo-Amerindios" zusammengefaßt werden. Während die Altiplaniden das Volk der Aymara sind und auch diese Sprache sprechen, wird von den Andiden Quechua gesprochen, wie auch von zahlreichen anderen Volksgruppen. Quechua war die offizielle Sprache des Inkareiches und auch die Spanier versuchten ihrerseits diese Sprache der Bevölkerung aufzuzwingen. Altiplaniden und Andiden wurden unter dem Begriff "Neo-Amerindios" zusammengefaßt, und während die Altiplaniden den Altiplano bewohnen, sind die Andiden mehr in den Tälern anzutreffen. Alle drei Gruppen haben sich im Laufe der Jahrhunderte an die Höhe angepaßt.

Im Juli 1535 betrat die erste Gruppe von etwa 570 Spaniern das Gebiet welches heute Bolivien umfaßt, und zwei Jahre später unterwarf Gonzalo Pizarro, der Bruder Franciscos, des Eroberers von Peru, die ersten Indianer im Tal von Cochabamba (2600 m). Kurz darauf entdeckte der Indianer Huallpa durch Zufall das Silber von Potosí und von da an wurden die Indianer gezwungen, in den Minen zu arbeiten. Es sollen ungefähr zwei Drittel der damals auf 8 Millionen geschätzten Bevölkerung unter den schrecklichen Lebensbedingungen umgekommen sein (12).

Mit der Ankunft der Spanier begannen die Völker sich zu vermischen und es entstand der "Mestizo", welcher heute den Großteil der Bevölkerung ausmacht. Die Spanier brachten auch Negerklaven, von denen der größte Teil in den Silberminen zugrunde ging. Nur die für die Landeigentümer in den Yungas arbeitenden Neger konnten überleben, so daß es dort heute noch eine Negerbevölkerung gibt.

Überschneiden der Größen von Hochland- und Tieflandbevölkerung sehr leicht zu Irrtümern führen kann, wenn man die Wirkung der Höhe auf das Körperwachstum feststellen möchte.

Während der gleichen Studie haben Greksa et al. (30) auch 351 in La Paz geborene Kinder europäischer Abstammung im Alter von 9 bis 20 Jahren untersucht und sie mit Tieflandkindern von ähnlichem sozio-ökonomischen Status verglichen. Die Autoren haben bei diesen Kindern gefunden, daß die Wirkung der Hypoxie auf die Körpergröße bei Jungen von minimal und null bei Mädchen bis zu einem Maximum von 3 cm bei beiden Geschlechtern reicht. Man hat daraus geschlossen, daß die Wirkungsgröße der Hypoxie relativ klein ist im Vergleich zum potentiellen Effekt anderer Faktoren, die das Wachstum von in der Höhe lebenden Kindern beeinflussen.

In einer multidisziplinären Arbeit, die Jungen im Vorpubertätsstadium mit hohem und niedrigem sozio-ökonomischen Status in La Paz, zwei vergleichbaren Gruppen von im Tiefland lebenden Kindern gegenüberstellt (39), kommen die Autoren zu dem Schluß, daß Körperwachstum und Entwicklung von Jungen im Vorpubertätsstadium hauptsächlich von dem sozio-ökonomischen Status abhängig sind und nicht von der Höhe, denn innerhalb der Gruppen von gleichem sozio-ökonomischen Status war kein Unterschied zwischen Hochland- und Tieflandkindern zu finden. Wachstum und Entwicklung der Kinder mit niedrigem sozio-ökonomischen Status waren in der Höhe und im Tiefland gleichermaßen um 2 Jahre verzögert. Greksa (24) hat seine Untersuchungen auch auf 56 Jungen und 52 Mädchen mit hohem sozio-ökonomischen Status europäischer Abstammung ausgedehnt, die im Tiefland geboren und deren Familien irgendwann nach La Paz gezogen waren. Ihr Alter reichte von 9,4 bis 19,0 Jahren (Durchschnitt 13,4, S.D. 2,6). Das Durchschnittsalter bei der Migration war 5,7 Jahre (0,1 bis 16,7 Jahre, S.D. 4,7) und sie hatten im Durchschnitt 7,8 Jahre in La Paz gelebt (0,2 bis 18,6 Jahre, S.D. 4,7). Die meisten Kinder kamen von der gleichen Privatschule, von der die europäischen, in La Paz geborenen Kinder aus Greksas vorhergehender Studie (30) gekommen waren. Die Resultate dieser Arbeit bestätigten, daß Wachstum und Entwicklung in der Höhe bei gut ernährten Kindern geringfügig verzögert sind, daß hingegen Brustkorbtiefe und Vitalkapazität signifikant vergrößert sind. Der Wert der Vitalkapazität ist eng mit der Größe der Dehnungsmöglichkeit des Brustkorbes verbunden.

Bolivien, das am 6. August 1825 von Spanien unabhängig wurde und seinen Namen von dem Befreier Simon Bolívar erhalten hat, ist ein Entwicklungsland mit einer Oberfläche von 1,09 Millionen km<sup>2</sup>, also doppelt so groß wie Österreich, Schweiz und Deutschland zusammen, aber mit nur 6,9 Millionen Einwohnern. Etwa die Hälfte des bolivianischen Territoriums befindet sich auf Höhen von über 2500 m, ein Drittel auf über 3000 m. In diesen Gebieten leben etwa 70 % der Gesamtbevölkerung. Allein die Stadt La Paz, die 1898 Regierungssitz wurde und welche sich über eine Höhe von 3200 bis 4100 m erstreckt, hat heute 1,2 Millionen Einwohner (45). Diese Einwohnerschaft setzt sich neben Mestizen und Bolivianern spanischer Abstammung auch aus Europäern, Nordamerikanern, Asiaten und Arabern zusammen. Sie ist daher eine Stadt, in der man wohl wie an keinem anderen Ort der Erde die akute und langfristige Höhenanpassung studieren kann. Was die Erforschung der langfristigen Höhenanpassung betrifft, so besteht ein Problem, das noch nicht gelöst werden konnte: Indianer und Mestizen mit hauptsächlich indianischer Beimischung haben immer einen niedrigeren Lebensstandard als die übrige Bevölkerung. Sie leben in Hütten ohne Trinkwasser- und Abwasserversorgung, sind häufig mangelernährt und so ist es möglich, daß Befunde der hypobarischen Hypoxie zugeschrieben werden, die in Wirklichkeit durch Mangelernährung verursacht sind. Das gilt sowohl für die Land- als auch für die Stadtbevölkerung.

#### GENETISCHER HINTERGRUND

Der Hauptanteil der Bevölkerung von La Paz besteht aus Mestizen mit Aymarabeimischung. Mit nicht invasiven Methoden ist es jedoch nicht einfach den genetischen Hintergrund genau zu bestimmen. Bei der Auswahl der Probanden wurden deshalb im Falle von Kindern und Jugendlichen Schüler einer bestimmten Schule untersucht (28, 30, 39). Die kostenlosen öffentlichen Schulen werden von Mestizos mit größerer Aymarabeimischung besucht, die teuren Privatschulen hauptsächlich von Europäern und Bolivianern spanischer Abstammung. Da man in Bolivien gewöhnlich die Zunamen beider Eltern trägt (z. B. Juan Mamani Quispe) wurden die Kinder auch nach beiden Zunamen jeden Elternteils gefragt, wodurch ein recht genaues Bild zustandekam. Es gab Kinder mit zwei Aymarazunamen, einem Aymara- und einem spanischen Zunamen und Kinder mit zwei spanischen Zunamen in den öffentlichen Schulen. Die einfachste

nicht invasive Methode ist jedoch die der Messung der Hautfarbe, welche eine starke genetische Komponente darstellt, vor allem, wenn eine Mischung zwischen zwei ganz verschiedenen Völkern stattgefunden hat wie in den Anden zwischen Indianern und Europäern. Die Hautfarbe kann durch Messung der Hautreflektanz bestimmt werden. Greksa et al. (33) haben mittels eines EEL Reflektanzspektrophotometers 556 aymarastämmige Personen in La Paz gemessen. Es handelte sich dabei um 305 männliche und 251 weibliche Probanden im Alter von 10,0–29,9 Jahren. Die Reflektanz wurde bei drei Wellenlängen gemessen: 425 nm, 545 nm und 685 nm, und an zwei Stellen, das heißt an der Innenseite des Oberarms und an der Stirne. Vergleiche zwischen drei Gruppen, nämlich Probanden mit zwei Aymara Zunamen, einem Aymara und einem spanischen Zunamen sowie zwei spanischen Zunamen stimmten mit der Hypothese überein, daß der Besitz zweier spanischer Zunamen in positivem Verhältnis steht zum Grad europäischer Beimischung bei den in der Stadt lebenden Mestizen.

## WACHSTUM UND ENTWICKLUNG

Das Wachstum von in der Höhe lebenden Kindern ist von zahlreichen Autoren beschrieben worden: Generell hat man gefunden, daß diese Kinder ein verzögertes Wachstum der Körpergröße aufweisen und ein beschleunigtes Wachstum des Brustkorbes im Vergleich zu Tieflandkindern (8, 9, 10, 22, 36, 44, 48). Man hat beide Wachstumsformen als Anpassungsreaktionen auf den Streß der Höhenhypoxie ausgelegt. Nicht alle Autoren beschreiben jedoch diese Wachstumsformen, und eine Erklärung für die unterschiedlichen Befunde könnte in der Tatsache zu finden sein, daß die Hypoxie, wenn auch ein wichtiger Streßfaktor in der Höhe, jedoch nur eine Komponente in einer Multistreß Umgebung darstellt.

Greksa et al. (28) haben in einer Studie von 446 in La Paz lebenden aymarastämmigen Kindern, im Alter von 10 bis 19 Jahren, festgestellt, daß diese Kinder in allen Altersstufen größer waren als vergleichbare Landkinder, daß ihre Größe aber ähnlich der peruanischer Stadtkinder war. Die Variation in der Größe unter den verschiedenen Gruppen von Höhenkindern war beträchtlich, nämlich 10 cm zwischen dem größten und kleinsten Jungen gleichen Alters und 8 cm zwischen dem größten und dem kleinsten Mädchen. Dazu kam noch, daß beide in der Höhe lebenden Stadtkindergruppen in ihrer Größe vergleichbar waren mit auf dem Lande lebenden Tieflandindianern. Man hat aus den Befunden geschlossen, daß dieses

## ATMUNGSANTRIEB

Langfristige Höhenanpassung hat eine verminderte Reaktion der Atemzentren zur Folge und zwar sowohl auf Hypoxie als auch auf Hyperoxie und Hyperkapnie. Die Reaktion auf Hypoxie wurde bereits vor 30 Jahren beschrieben sowohl in den Himalayas (43, 40) als auch in den Anden (13, 6, 41, 18). Nach Einatmung reinen Sauerstoffs während zweier Atmungszyklen (Dejours Test) vermindert der Höhenbewohner seine Ventilation verzögert und in geringerem Ausmaße als der Tieflandbewohner. Dasselbe geschieht in umgekehrter Weise bei der Einatmung von reinem Stickstoff, denn da vermehrt der Höhenbewohner seine Ventilation ebenfalls verzögert und in geringerem Maße als der Tieflandbewohner (51). Auch auf die Inhalation von Kohlendioxyd reagiert der Höhenbewohner in verminderter Stärke (16). Diese Verminderung des Atemantriebs der Höhenbewohner bleibt auch noch nach langem Aufenthalt im Tiefland erhalten, weshalb man sie auf genetische Faktoren zurückgeführt hat.

## GASAUSTAUSCH UND DIFFUSION

Der geringere Sauerstoffpartialdruck in der Einatemungsluft in La Paz ( $P_{IO_2} = 95$  mm Hg oder 12,6 kPa) bei einem Barometerdruck von durchschnittlich 500 mm Hg oder 66,6 kPa, hat einen geringeren Sauerstoffpartialdruck in den Lungenalveolen zur Folge, nämlich 64 mm Hg im Vergleich zu 105 mm Hg im Tiefland sowie einen geringeren alveolo-kapillaren Druckgradienten (3–5 mm Hg im Vergleich zu 7,5–10 auf Meereshöhe). Die Diffusionskapazität, die im Instituto Boliviano de Biología de Altura mit Kohlenmonoxyd gemessen wird, ist bei Höhenbewohnern signifikant vermehrt, sogar schon bei Kindern zwischen 4 und 6 Jahren. Vargas et al. (51) haben bei 138 Personen im Alter von 20–35 Jahren eine DLCO von  $28,6 \pm 1,4$  ml/min/mm Hg gemessen. Auf Meereshöhe werden für die gleiche Altersgruppe  $20,2 \pm 1,8$  ml/min/mm Hg angegeben. Bei Jungen zwischen 4 und 6 Jahren war DLCO  $13,2 \pm 2,7$  und bei Mädchen gleichen Alters  $14,2 \pm 1,9$  (50). Alle DLCO Messungen wurden nach Dinakara für die Hämoglobinkonzentration korrigiert, die ja bekanntermaßen bei Höhenbewohnern vermehrt ist. Sicher haben aber auch eine vergrößerte Lungenoberfläche und vermehrtes Residualvolumen Einfluß auf DLCO und Gasaustausch. In Hunderten von Blutgasanalysen wurden im I.B.B.A. folgende Normalwerte für La Paz festgesetzt: pH – 7,4;  $P_{aO_2}$  – 60 mm Hg;  $P_{aCO_2}$  – 30 mm Hg;  $SaO_2$  – 95 %;

und gleichen Geschlechtes. Es zeigte sich, daß die Totalkapazität der Lunge tatsächlich in erster Linie als Resultat eines größeren Residualvolumens erhöht war, in zweiter Linie wegen der vergrößerten Vitalkapazität. Außerdem zeigten Schätzungen der Wirkungsgröße der hypobarischen Hypoxie auf alle diese Lungenfunktionsmessungen ein positives Verhältnis zum Alter. Dieser Befund bestärkt die Vermutung, daß Wachstum und Entwicklung in der Höhe mit einer konstanten Vergrößerung der Lungentotalkapazität verbunden sind im Gegensatz zum Tiefland, was die Erwartungen der Hypothese der Höhenanpassung während der Entwicklung erfüllen würde. Allerdings waren diese Verhältnisse nur bei den Jungen statistisch signifikant, nicht aber bei den Mädchen, woraus geschlossen werden kann, daß der Wirkungsgrad der chronischen hypobarischen Hypoxie auf Totalkapazität, Residualvolumen und Vitalkapazität bei Jungen und Mädchen ähnlich ist, daß aber wohl ein Unterschied besteht zwischen den Geschlechtern bezüglich der Art der Entwicklung dieser Volumina. In einer Untersuchung von 39 erwachsenen Aymara Männern und 23 Frauen im Alter von 20,1 bis 28,8 Jahren stellte Greksa (27) fest, daß die Lungentotalkapazität der La Paz Aymara Männer 1 % größer war als bei peruanischen Hochlandindianern und 4 % größer als bei Tibetanern.

Was die Lungenvolumina und -funktion von in der Höhe geborenen und aufgewachsenen Europäern betrifft, so haben Greksa et al. (32) bei 161 Jungen und 158 Mädchen Vitalkapazität, absolute Sekundenkapazität und relative Sekundenkapazität gemessen und diese mit den Werten von Tiefland-Europäern und Hochland-Aymara verglichen. Dabei wurde festgestellt, daß die La Paz-Europäer eine signifikant höhere Vitalkapazität und Sekundenkapazität aufwiesen als die Tiefland-Kontrollgruppen, wobei die relativen Unterschiede zwischen den Gruppen von gering (1,5–4,1 %) bis mäßig (7,7–11,9 %) reichten. Es konnte jedoch nicht bestimmt werden, ob diese vergrößerten Lungenvolumina, wie bei den Aymara-Hochlandkindern, durch eine beschleunigte Entwicklung der Lungenfunktion im Verhältnis zur Körpergröße erworben werden. Auf Körpergröße und Thoraxdimensionen bezogen waren Vitalkapazität und Sekundenkapazität der La Paz-Europäer signifikant kleiner als bei den Aymara ( $p < .001$ ), was vermuten läßt, daß die Lungenvolumina der Aymara durch andere Faktoren beeinflußt werden als nur durch Wachstum und Entwicklung in der Höhe. Aber auch bei den Europäern war die Brustkorbgröße eine wichtige Determinante für inter-individuelle Unterschiede der Lungenfunktion.

Bicarbonat – 19 mmol/l. Die relativ hohe Sauerstoffsättigung ist auf die in der Höhe bestehende Rechtsverschiebung der Sauerstoffdissoziationskurve zurückzuführen. Dies wurde bereits 1944 von Aste Salazar und Hurtado in Peru festgestellt (5). A. Geysant hat für seine Doktorarbeit in La Paz mittels Tonometrie unter Standardbedingungen  $P_{50}$  gemessen ( $P_{aO_2}$  bei einer Sättigung von 50 %) und einen Wert von 29 mm Hg gefunden (Meereshöhe 26 mm Hg), gleichzeitig wurde eine Vermehrung des 2,3-DPG von 0,73 mol/mol Hb auf 1,12 mol/mol Hb gemessen. Die Rechtsverschiebung der Sauerstoffdissoziationskurve wird von manchen Autoren als eines der wichtigsten Phänomene der Höhenanpassung bezeichnet (51), weil dadurch die Affinität des Hämoglobins für Sauerstoff vermindert wird, was eine bessere Ausnutzung des Sauerstoffes zur Folge hat.

## LUNGENKREISLAUF

Seit Rotta et al. (46) ihre vergleichende Arbeit über den Lungenkreislauf im Tiefland und im Hochland veröffentlicht haben, die sie in Morococha, Peru (4540 m) ausgeführt hatten, ist bekannt, daß der verminderte alveoläre Sauerstoffpartialdruck eine Gefäßkonstriktion in der Lungenarterie und damit einen erhöhten Gefäßwiderstand und -druck bewirkt. Diese Befunde wurden später bestätigt, sowohl in Peru als auch in Bolivien (47, 14). Cudkowicz (17) beschreibt für Höhen über 3000 m eine empirische Gleichung, die aussagt, daß der Mitteldruck in der Lungenarterie direkt proportional zum Sauerstoffpartialdruck in der Einatemungsluft ist und umgekehrt proportional zum Produkt aus dem bestehenden Barometerdruck und dem alveolären Sauerstoffpartialdruck:

$$MPAP = \frac{PIO_2 \times 10}{\left(\frac{PBA-47}{713}\right) \times PAO_2}$$

- MPAP = Mitteldruck in der Lungenarterie
- $PIO_2$  = Sauerstoffpartialdruck in der Einatemungsluft
- PBA = bestehender Barometerdruck
- 47 = Wasserdampfdruck bei 37 Grad C (Körpertemperatur)
- 713 = Barometerdruck auf Meereshöhe weniger 47
- $PAO_2$  = Sauerstoffpartialdruck in den Alveolen

Mit dieser Formel wurde für die Höhe von La Paz ein Mitteldruck in der Lungenarterie von etwa 23 mm Hg vorausgesagt. Die Resultate von den

Um die Wirkung der Höhenhypoxie auf die körperliche Reife zu bestimmen, hat Greksa (25) das Alter der Menarche von in der Höhe lebenden europäischen und aymarastämmigen Mädchen mit dem europäischer im Tiefland (Santa Cruz, 420 m) lebender Mädchen verglichen. Er hat dabei festgestellt, daß Wachstum und Entwicklung in der Höhe bei den europäischen Mädchen im Mittel eine Verzögerung von 0,8 Jahren aufwies. Das mediane Alter bei den europäischen Mädchen in La Paz war 13,1 Jahre, in Santa Cruz 12,3. Die aymarastämmigen Mädchen in La Paz waren im Alter von 13,4 Jahren bei der Menarche, und die nach La Paz migrierten Europäerinnen von 13,8 Jahren. Der unerwartete Befund bei den europäischen Migrantinnen kann zwei Gründe haben: Die Probandengruppe war zu klein (84 Migrantinnen im Vergleich zu 199 in La Paz geborenen Europäerinnen) oder aber die Migrantinnen stammten hauptsächlich aus mittel- und nordeuropäischen Ländern, während die in La Paz geborenen Europäerinnen zu 60 % rein spanischer, also südeuropäischer Abstammung waren.

### LUNGENVOLUMINA UND -FUNKTION

In den Anden geborene und dort lebende Menschen weisen eine beschleunigte Thoraxentwicklung und damit verbundene Vergrößerung verschiedener Lungenvolumina auf. Hurtado (38) argumentierte, daß der funktionell wichtige Aspekt dieser einzigartigen Atmungsform in der Höhe die Entwicklung einer vergrößerten Lungentotalkapazität sei. Er bewies, daß diese bei erwachsenen Männern in den Anden in erster Linie auf eine Vergrößerung des Residualvolumens und an zweiter Stelle der Vitalkapazität zurückzuführen sei. Frisncho (23) stellte die Hypothese auf, daß diese Atmungsform während der Wachstums- und Entwicklungsperiode erworben wird. Die meisten Resultate von Lungenfunktionsmessungen der Höhenbewohner in den Anden basierten jedoch auf Studien von Erwachsenen und es gab keine Messungen an Kindern.

Greksa et al. (34) veröffentlichten eine Arbeit, in welcher sie über Untersuchungen von 164 Jungen und 143 Mädchen berichten, im Alter von 10,0–19,9 Jahren. Alle waren aymarastämmig, in Höhen von über 2500 m geboren und lebten in La Paz. Die statistischen Analysen zeigten, daß alle Messungen bei den Jungen 5–6 % höher waren als bei den Mädchen mit Ausnahme des Residualvolumens. Wie erwartet waren alle Lungenvolumina signifikant größer als bei Tieflandkindern gleicher Körpergröße

Werte der Andenbevölkerung in den Minengebieten und Städten nicht in der Bergarbeit per se zu suchen sind, sondern zumindest teilweise in der Einschließung von Europäern und Mestizen, deren Vorfahren höchstens 500 Jahre in der Höhe gelebt haben können, zusammen mit Hochlandindianern, deren Vorfahren tausende von Jahren dort gelebt haben, aber auch Hochlandbevölkerung, die weit oberhalb ihrer gewohnten Höhe lebte. In der Himalayabevölkerung hingegen hat keine Beimischung stattgefunden.

## ARBEITSKAPAZITÄT

Die Arbeitskapazität wird generell mittels Messung des maximalen Sauerstoffverbrauches ( $\text{VO}_2 \text{ max}$ ) während progressiver Arbeit auf dem Fahrradergometer oder Laufband ermittelt. Da der  $\text{VO}_2 \text{ max}$  Aufschluß über das gesamte Sauerstofftransportsystem gibt, wird er sehr häufig zur Feststellung des Grades der Höhenanpassung verwendet. Da jedoch außer der Hypoxie noch zahlreiche andere Faktoren auf den  $\text{VO}_2 \text{ max}$  einwirken, ist es sehr wichtig vergleichbare Gruppen zu analysieren. Greksa et al. (29) haben bei 28 Aymara-Indianern (Durchschnittsalter 26,4 Jahre) mit einem progressiven Laufbandtest einen  $\text{VO}_2 \text{ max}$  von 46,5 ml/min/kg und eine maximale Herzfrequenz von 173 gemessen. Bei einer vergleichbaren Gruppe von Quechua-Indianern in Nuñoa, Peru (4000 m) hatte Baker (7) mit Fahrradergometer test einen  $\text{VO}_2 \text{ max}$  von 49,1 ml/min/kg und eine maximale Herzfrequenz von 171 ermittelt, also sehr ähnliche Werte. In einer späteren Arbeit haben Greksa et al. (31) 47 Kinder und Jugendliche mit Laufbandtests untersucht. Sie waren in 4 Gruppen unterteilt: 11- und 18-jährige Aymara und 11- und 18-jährige Europäer. Der Unterschied zwischen den jüngeren und älteren Versuchspersonen war signifikant:  $\text{VO}_2 \text{ max}$  Aymara: 45,9 und 50,9 ml/min/kg; Europäer: 42,5 und 47,0 ml/min/kg. Man beobachtet zwar eine Tendenz zu einem höheren  $\text{VO}_2 \text{ max}$  bei den aymarastämmigen Jugendlichen, aber der Unterschied ist statistisch nicht signifikant. Fellmann et al. (21) haben 11-jährige Europäer in La Paz mit Europäern gleichen Alters in Clermont-Ferrand (Frankreich) verglichen und signifikante Unterschiede festgestellt:  $\text{VO}_2 \text{ max}$  war bei den La Paz Kindern um 15 % und die maximale Herzfrequenz um 11 Schläge pro Minute niedriger, dagegen hatten sie eine vermehrte Ventilation und einen höheren Atmungsquotienten. Kein Unterschied war dagegen in der maximalen Laktatkonzentration festzustellen: La Paz  $6,0 \pm 0,3 \text{ mM}$ ; Cler-

der Aorta zu dem der Lungenarterie war im Tiefland höher in allen Altersgruppen. Diese Beobachtungen stimmen überein mit der Persistenz eines hohen Druckes in der Lungenarterie während des Kleinkindalters. Bei einer echokardiographischen und elektrokardiographischen Untersuchung von 33 11-jährigen in der Höhe geborenen Schuljungen fanden Antezana et al. (1) im EKG in 6 Fällen (18 %) eine Hypertrophie der rechten Herzkammer. Der Vergleich der EKG-Parameter mit solchen im Tiefland zeigte einen signifikanten Unterschied in der QRS-Dauer und in der Voltage der S-Welle in V1 und V6. Die individuelle Analyse der Echokardiographien zeigte eine Vergrößerung der Dimensionen der rechten Herzkammer in 12 Fällen (36 %). In 6 % bestand eine direkte Korrelation zwischen Hypertrophie des rechten Ventrikels im EKG und den echokardiographisch vergrößerten Dimensionen der rechten Herzkammer. Generell bestand jedoch kein Unterschied zwischen den Befunden im Hochland und im Tiefland. Zusammenfassend kann man sagen, daß sich die langfristige Höhenanpassung vor allem am rechten Herzen zeigt.

### HÄMOGLOBINKONZENTRATION

Eines der bekanntesten Höhenanpassungszeichen ist die Vermehrung der Erythrozytenzahl und damit der Hämoglobinkonzentration. Die Kurve der Vermehrung der Hämoglobinkonzentration mit steigender Höhe verläuft bis zu 3000 m linear, darüber wird ihre Form parabolisch. Es gibt also für jede Höhe eine "normale" Hämoglobinkonzentration. Für La Paz liegt diese bei  $18,8 \pm 1,4$  g/dl für die männliche Bevölkerung (49). Der Grenzwert für Anämie liegt bei 15,8 g/dl und für Polyzythämie bei 20,0 g/dl. Der Eisenstatus ist ähnlich wie im Tiefland, auch das weiße Blutbild ist nicht verändert. Arnaud et al. (4) haben Unterschiede zwischen der Aymara und Quechua Bevölkerung gefunden. In einer Studie von 720 erwachsenen Aymara (Alter  $29 \pm 11$  Jahre, Verhältnis der Geschlechter 1,85) geben sie 18,2 g/dl an, und für 452 erwachsene Quechua 15,8, beide Gruppen wurden in La Paz untersucht. Beall (11) fand in einer vergleichenden Studie zwischen Anden- (3800 – 3900 m) und Himalayalandbevölkerung (3400 – 4000 m), daß die Menschen im Himalaya durchschnittlich eine Hämoglobinkonzentration von 1,4 g/dl weniger hatten als die Andenvölker. Dieser Unterschied konnte nicht mit geringerem hypoxischen Streß, Labortechnik, Mangelernährung und Krankheit erklärt werden. Beall schließt aus ihren Ergebnissen, daß mögliche Ursachen der höheren Hb-

mont-Ferrand  $6,7 \pm 0,5$  mM. Die gleichen Autoren haben in einer späteren Studie (39) festgestellt, daß Kinder im Vorpubertätsstadium mit niedrigem sozio-ökonomischen Status zwar entwicklungsmäßig 2 Jahre zurück waren, daß dies jedoch keinen Einfluß auf den  $VO_2$  max hatte. Aber auch in dieser Arbeit wird von einer Verminderung des  $VO_2$  max um 11 % im Vergleich zum Tiefland berichtet, unabhängig vom sozio-ökonomischen Status.

Favier et al. (19) haben in einer Gruppe von 50 gesunden Höhenbewohnern mittels Fahrradergometertest den maximalen Sauerstoffverbrauch in chronischer Hypoxie (Umgebungsluft) und akuter Normoxie (mit Sauerstoff angereicherte Luft,  $ClO_2 = 31,4$  %) gemessen und dabei wesentliche Unterschiede zu an die Höhe akklimatisierten Tieflandbewohnern festgestellt: Auch die Höhenbewohner vergrößern  $VO_2$  max in akuter Normoxie, jedoch nur um etwa 8%. Je größer  $VO_2$  max in Hypoxie desto geringer die Zunahme in Normoxie im Gegensatz zu 14 an die Höhe akklimatisierten Tieflandbewohnern, bei denen Delta  $VO_2$  max direkt proportional zu  $VO_2$  max in Hypoxie war. Die arterielle Sauerstoffsättigung fiel in geringerem Maße bei den in der Höhe geborenen Testpersonen während der Arbeit sowohl in Hypoxie als auch in Normoxie als bei den akklimatisierten Tieflandbewohnern. Die Höhenbewohner mit hoher aerobischer Kapazität zeigen ein geringeres Atemvolumen während der Arbeit und eine reduzierte Sauerstoffsättigung, was die verminderte Fähigkeit,  $VO_2$  max in Normoxie zu erhöhen, erklären könnte. Die maximalen Laktatkonzentrationen lagen im selben Bereich (8–10 mM) wie für Tieflandbewohner angegeben wird. Delta-Arbeitseffizienz erreichte 26–28 % in Hypoxie und Normoxie bei Höhenbewohnern und gleichermaßen bei akklimatisierten Tieflandbewohnern.

Schließlich haben Favier et al. (20) die gleichen Höhenbewohner einem Trainingsprogramm unterzogen, das im Tiefland bei Tieflandbewohnern angewandt worden war (37). Eine Gruppe trainierte in Hypoxie, die andere in Normoxie. Training mit der gleichen Intensität und mit Sauerstoffzufuhr hat  $VO_2$  max nicht zusätzlich verbessert. Außerdem hat das Normoxietraining bei den Höhenbewohnern zu einer erhöhten Laktatanhäufung während maximaler Arbeit geführt mit einem größeren Fall des arteriellen pH, der Bikarbonatkonzentration und des Basenexzesses. Die Autoren schließen, daß bei Höhenbewohnern

1. das Höhenttraining keinen Vorteil gegenüber dem Training im Tiefland bringt, was die maximale aerobische Kapazität betrifft, gleichgültig ob

ersten Herzkathetern an 9 männlichen und 2 weiblichen Versuchspersonen (Durchschnittsalter 22,4 Jahre) ergaben einen Druck von 22,9 mm Hg. Coudert (14) fand in einer Studie an 67 männlichen Versuchspersonen einen MPAP von 21 mm Hg. Der Lungenkapillardruck ist hingegen mit Tieflandwerten vergleichbar. Bei körperlicher Arbeit wurde eine beträchtliche Steigerung von MPAP gefunden. Spielvogel et al. (47) fanden eine Erhöhung von 109% und Coudert (14) 60 %. Die Gabe von reinem Sauerstoff reduzierte MPAP von 22,9 auf 16 mm Hg, während Abkühlung der Haut an Extremitäten und Abdomen den Druck in der Lungenarterie um 12–14 % erhöhte und den Gefäßwiderstand um 20 % (15). Drei Faktoren dürften den erhöhten Druck in der Lungenarterie bewirken:

1. Der schon erwähnte verminderte Sauerstoffpartialdruck in der Einatemungsluft,
  2. die von Arias Stella und Saldaña (3) beschriebene Muskularisierung der distalen Portionen der Lungenarterien und
  3. sicher auch die erhöhte Viskosität des Blutes der Höhenbewohner.
- Heath et al. (35) haben die von Arias Stella und Saldaña beschriebene abnormale Muskularisierung nicht bei allen von 19 untersuchten Autopsiespezimen gefunden und erklären, daß möglicherweise eine Abhängigkeit von der Rasse bestünde. Sie fanden eine abnormale Muskularisierung der Lungenarteriolen in 5 von 7 Indianern, in einem von 4 Mestizen und einem von 5 Kaukasiern.

## HERZ UND GROSSER KREISLAUF

Außer dem erhöhten Druck in der Lungenarterie besteht auch ein vermehrter Druck in der rechten Herzkammer, während die Druckverhältnisse im linken Herzen und im großen Kreislauf denen auf Meereshöhe gleich sind. Herzminutenvolumen und Herzindex sind ebenfalls nicht erhöht und ebensowenig die Herzfrequenz. Aparicio Otero et al. (2) haben mittels M mode und bidimensionaler Echokardiographie 50 Neugeborene und Kleinkinder in den ersten Lebensmonaten in La Paz und 56 in Santa Cruz (400 m) untersucht. Im Tiefland verkleinert sich der Durchmesser der Vorderwand des rechten Ventrikels während des ersten Lebensmonats bis zu einer Dimension, die für den Rest des Kleinkindalters bestehen bleibt. In der Höhe ist der Durchmesser der Vorderwand der rechten Herzkammer bei der Geburt ebenso groß wie im Tiefland, vermindert sich aber nicht während der ersten 12 Lebensmonate. Das Verhältnis des Durchmessers

- 77–85 (1988).
- (33) Greksa, L.P., H. Spielvogel and J. Driscoll: Skin reflectance in children and young adults of Aymara ancestry. *Am. J. Hum. Biol.* 3: 97–104 (1991).
  - (34) Greksa, L.P., H. Spielvogel and E. Caceres: Total lung capacity in young highlanders of Aymara ancestry. *Am. J. Phys. Anthropol.* 94: 477–486 (1994).
  - (35) Heath, D., P. Smith, J. Ríos Dalenz, D. Williams and P. Harris: Small pulmonary arteries in some natives of La Paz, Bolivia. *Thorax* 36: 599–604 (1981).
  - (36) Hoff, C.: Altitudinal variations in the physical growth and development of Peruvian Quechua. *Homo* 24: 87–99 (1974).
  - (37) Hoppeler, H., H. Howald, K. Conley, S.L. Lindstedt, H. Claassen, P. Vock and E.W. Weibel: Endurance training in humans: Aerobic capacity and structure of skeletal muscle. *J. Appl. Physiol.* 59: 320–327 (1985).
  - (38) Hurtado, A.: Animals in high altitudes: Resident man. In: D.B. Dill, E.F. Adolph and C.G. Wilber (eds.): *Handbook of Physiology, Section 4: Adaptation to the environment*. Washington, D.C.: American Physiological Society, 843–868 (1964).
  - (39) Kemper, H.C.G. and C. Coudert: (eds.) *Physical health and fitness of Bolivian boys*. *Int. J. Sports Med. Supplement 2, Vol. 15*, 71–114 (1994).
  - (40) Lahiri, S., J.S. Milledge, A.P. Chattopdhyay, A.K. Bhattacharyya and A.K. Sinha: Respiration and heart rate of Sherpa highlanders during exercise. *J. Appl. Physiol.* 23: 545 (1967).
  - (41) Lefrançois, R., H. Gautier and P. Psquais: Ventilatory oxygen drive in acute and chronic hypoxia. *Respir. Physiol.* 4: 217 (1968).
  - (42) Mac Neish, R.S.: Early man in the Andes. *Scientific American* 224 (4), 36–46 (1971).
  - (43) Milledge, J.S. and S. Lahiri: Respiratory control in lowlanders and Sherpa highlanders at altitude. *Respir. Physiol.* 2: 310 (1967).
  - (44) Mueller, W.H., V.N. Schull, W.J. Schull, P. Soto and F. Rothhammer: A multinational Andean genetic and health program: Growth and development in an hypoxic environment. *Ann. Hum. Biol.* 5: 329–352 (1978).
  - (45) Republica de Bolivia, Ministerio de Planeamiento y Coordinación, Instituto Nacional de Estadística; Censo Nacional de Población y

- sie in chronischer Hypoxie oder akuter Normoxie gemessen wird,
2. zusätzlicher Sauerstoff allein oder mit Vermehrung der Arbeitsintensität zusammen kann  $\text{VO}_2$  max nicht weiter verbessern,
  3. Training in Normoxie verursacht bei den in der Höhe geborenen Testpersonen eine geringere Pufferkapazität.

Auf welche Weise genau die langfristige Höhenanpassung erfolgt, ist durchaus noch nicht geklärt, aber aus den vorausgegangenen Ausführungen kann man ersehen, daß Unterschiede zwischen den im Hochland lebenden Völkern bestehen, und daß zwei Faktoren eine wichtige Rolle spielen: Genetische Anpassung und Anpassung während der Wachstums- und Entwicklungsperiode.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, stützt sich der vorangehende Bericht größtenteils auf Arbeiten, die im Instituto Boliviano de Biología de Altura (Bolivianisches Institut für Höhenbiologie, I.B.B.A.), Universidad Mayor de San Andres in La Paz, durchgeführt worden sind und mit denen eine Übersicht über die langfristige Höhenanpassung in den Anden vorgelegt werden soll.

#### LITERATUR

- (1) Antezana, G., O. Aparicio Otero, J. Coudert, G. Leguía and A. Morales Guzman: Hallazgos electrocardiográficos y ecocardiográficos en niños normales nativos de altura (3650 m). Anuario del I.B.B.A. 1986–1987, 9–13 (1987).
- (2) Aparicio Otero, O., F. Romero Gutierrez, P. Harris and I. Anand: Echocardiography shows persistent thickness of the wall of the right ventricle in infants at high altitude, *Cardioscience* 2: 63–69 (1991).
- (3) Arias Stella, J. and M. Saldaña: The terminal portion of the pulmonary arterial tree in people native to high altitudes. *Circulation* 28: 915 (1963).
- (4) Arnaud, J., N. Gutierrez, W. Tellez and H. Vergnes: Haematology and erythrocyte metabolism in man at high altitude; An Aymara-Quechua comparison. *Am. J. Phys. Anthropol.* 67: 279–284 (1985).
- (5) Aste Salazar, H. and A. Hurtado: The affinity of hemoglobin for oxygen at sea level and at high altitudes. *Inst. de Biol. Andina, Am. J. Physiol.* 142: 733 (1944).
- (6) Bainton, C.R., A. Carcelen and J.W. Severinghaus: Carotid chemoreceptor insensitivity in Andean natives. *J. Physiol. Lond.* 177: 30

- Grünenfelder, M. Leuenberger, L. Tüscher, E. Caceres and H. Hoppler: Training in hypoxia vs. training in normoxia in high-altitude natives. *J. Appl. Physiol.* 78 (6): 2286–2293 (1995).
- (21) Fellmann, N., M. Bedu, H. Spielvogel, G. Falgairette, E. Van Praagh and J. Coudert: Oxygen debt in submaximal and supramaximal exercise in children at high and low altitude. *J. Appl. Physiol.* 60 (1): 209–215 (1986).
- (22) Frisancho, A.R. and P.T. Baker: Altitude and growth: A study of the patterns of physical growth of a high altitude Peruvian Quechua population. *Am. J. Phys. Anthropol.* 32: 279–292 (1970).
- (23) Frisancho, A.R., T. Velasquez and J. Sanchez: Influence of developmental adaptation on lung function at high altitude. *Hum. Biol.* 45: 583–594 (1973).
- (24) Greksa, L.P.: Effect of altitude on the stature, chest depth and forced vital capacity of low-to-high altitude migrant children of European ancestry. *Hum. Biol.* 60: 23–32 (1988).
- (25) Greksa, L.P.: Age of Menarche in Bolivian girls of European and Aymara ancestry. *Ann. Hum. Biol.* 17: 49–53 (1990).
- (26) Greksa, L.P.: Developmental responses to high altitude hypoxia in Bolivian children of European ancestry: A test of the developmental adaptation hypothesis. *Am. J. Hum. Biol.* 2: 603–612 (1990).
- (27) Greksa, L.P.: Total lung capacity in Andean highlanders. *Am. J. Biol.* 6: 491–498 (1994).
- (28) Greksa, L.P., H. Spielvogel, L. Paredes-Fernandez, M. Paz-Zamora and E. Caceres: The physical growth of urban children at high altitude. *Am. J. Phys. Anthropol.* 65: 315–322 (1984).
- (29) Greksa, L.P., J.D. Haas, T.L. Leatherman, R.B. Thomas and H. Spielvogel: Work performance of high altitude Aymara males. *Ann. Hum. Biol.* 11: 227–233 (1984).
- (30) Greksa, L.P., H. Spielvogel and E. Caceres: Effect of altitude on the physical growth of upper class children of European ancestry. *Ann. Hum. Biol.* 12: 225–232 (1985).
- (31) Greksa, L.P., H. Spielvogel and L. Paredes-Fernandez: Maximal exercise capacity in adolescent European and Amerindian high altitude natives. *Am. J. Phys. Anthropol.* 67: 209–216 (1985).
- (32) Greksa, L.P., H. Spielvogel, M. Paz-Zamora, E. Caceres and L. Paredes-Fernandez: Effect of altitude on the lung function of high-altitude residents of European ancestry. *Am. J. Phys. Anthropol.* 75:

- (1965).
- (7) Baker, P.T.: Human adaptation to high altitude. *Science* 163: 1149–1156 (1969).
  - (8) Beall, C.M.: Growth in a population of Tibetan origin at high altitude. *Ann. Hum. Biol.* 8: 31–38 (1981).
  - (9) Beall, C.M.: A comparison of chest morphology in high altitude Asian and Andean populations. *Hum. Biol.* 54: 145–163 (1982).
  - (10) Beall, C.M., P.T. Baker, T.S. Baker and J.D. Haas: The effects of high altitude on adolescent growth in Southern Peruvian Amerindians. *Hum. Biol.* 49: 109–124 (1977).
  - (11) Beall, C.M., G.M. Brittenham, F. Macuaga and M. Barragán: Variation of hemoglobin concentration among samples of high altitude natives in the Andes and the Himalayas. *Am. J. Hum. Biol.* 2: 639–651 (1990).
  - (12) "Bolivien Verstehen", *Sympathiemagazin* Nr. 21, herausgegeben vom Studienkreis für Tourismus (1990).
  - (13) Chiodi, H.: Respiratory adaptations to chronic high altitude hypoxia. *J. Appl. Physiol.* 10: 81 (1957).
  - (14) Coudert, J.: La circulation pulmonaire du natif de la haute altitude a La Paz (3700 m). In: *Anthropologie des Populations Andines*, Edition INSERM, Paris, 63: 305 (1976).
  - (15) Coudert, J., G. Antezana, A. Geysant et H. Spielvogel: Effets hémodynamiques du refroidissement de la peau chez l'homme résidant a haute altitude (3700 m). *J. Physiol. Paris* 74: 24a (1978).
  - (16) Coudert, J., M. Paz Zamora and E. Vargas: Volumes pulmonaires, ventilation et pressions des gaz du sang chez les résidents de haute altitude transférés a basse altitude. *J. Physiol.* 67: 336 (1973).
  - (17) Cudkovicz, L.: Mean pulmonary artery pressure and alveolar oxygen tension in man at different altitudes. *Respiration* 27: 417–430 (1970).
  - (18) Cudkovicz, L., H. Spielvogel and G. Zubieta: Respiratory studies in women at high altitude (3.600 m or 12,200 ft and 5200 or 17,200 ft). *Respiration*: 29: 393–426 (1972).
  - (19) Favier, R., H. Spielvogel, D. Desplanches, G. Ferretti, B. Kayser and H. Hoppeler: Maximal exercise performance in chronic hypoxia and acute normoxia in high-altitude natives. *J. Appl. Physiol.* 78 (5): 1868–1874 (1995).
  - (20) Favier, R., H. Spielvogel, D. Desplanches, G. Ferretti, B. Kayser, A.

- Vivienda, 1992, Resultados finales, Mayo 1993.
- (46) Rotta, A., A. Canepa, A. Hurtado, T. Velasquez and R. Chavez: Pulmonary circulation at sea level and at high altitude. *J. Appl. Physiol.* 9: 328 (1956).
  - (47) Spielvogel, H., L. Otero-Calderon, G. Calderon, R. Hartmann and L. Cudkowicz: The effects of high altitude on pulmonary hypertension of cardiopathies at La Paz, Bolivia. *Respiration* 26: 369–386 (1969).
  - (48) Stinson, S.: The physical growth of high-altitude Bolivian Aymara children. *Am. J. Phys. Anthropol.* 52: 377–385 (1980).
  - (49) Tufts, D.A., J.D. Haas, J.L. Beard and H. Spielvogel: Distribution of hemoglobin and functional consequences of anemia in adult males at high altitude. *Am. J. Clin. Nutr.* 42: 1–11 (1985).
  - (50) Vargas, E., J. Beard, J. Haas and L. Cudkowicz: Pulmonary diffusing capacity in young Andean highland children. *Respiration* 43: 330–335 (1982).
  - (51) Vargas, E., M. Villena, G. Castillo, A.M. de Quiroga and G. Contreras: Fisiología de la adaptación respiratoria a la vida en altura. Instituto Boliviano de Biología de Altura, Libro Bodas de Plata 1963–1988, 22–51 (1988).
  - (52) Vellard, J.A.: Etude anthropométrique des populations indigènes du Pérou et de la Bolivie. In: *Anthropologie des populations Andines*, Edition INSERM, Paris (1976).
  - (53) Willey, G.R.: An introduction to American archaeology, Vol. 2, South America, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall (1971).



---

E. Jenny

*Beeinflussung  
des Herz-Kreislaufsystems  
durch Höhe und Bergsteigen*

*The Influence of Altitude and Mountain Climbing on the Heart and Circulatory System*

SUMMARY

The contribution opens with a description of the various altitude zones as well as the general and high-altitude influences that can pose a threat to the life and health of mountaineers. Clinical high-altitude medicine is briefly presented in its development from past misconceptions to the modern-day role of mountain climbing in preventive, curative and rehabilitative medicine. Basic rules for mountain climbers and consulting physicians are given with a view to preventing injuries and health problems. Important anamnestic warning signs for high-altitude pulmonary edema are given, and an attempt is made to explain the harmless syncope that is a frequent occurrence at high elevations. ECG is a good screening for alpinists but provides only limited information. No pronounced ECG changes were observed in healthy mountain climbers during short stays at altitudes of up to approximately 3,500 m. Only during prolonged sojourns or continued ascent are typical signs of a strain on the right ventricle seen; these disappear completely on returning to the valley floor. This pulmonary hypertension, that is responsible for pulmonary edema at high altitude, can be treated with nifedipine, even though all ECG signs of strain on the right ventricle are not eliminated with this therapy. Extrasystoles of supraventricular or ventricular origin are common at high and extreme altitudes. A mountaineer's exercise ECG is no different than that of other athletes. Consequent limitation of physical exertion at medium altitudes is necessary and individually possible. A typical ECG with the so-called Osborn wave occurs for accidental hypothermia. Age affects a climber's altitude tolerance and physical