



Abb. 1: Klassisches Hochlager am Manaslu (8 163 m) während der militärischen Ausbildung „Taktische Höhenphysiologie“ in 5 400 m Höhe (Bild: Markus Tannheimer)

Vor-Ort Therapie des Höhenlungenödems: Vergleich von Flaschensauerstoff und PEEP-Atmung mit Lippenbremse

On-site Therapy of High-Altitude Pulmonary Edema: Comparison of Bottled Oxygen and Pursed Lips PEEP Breathing

Markus Tannheimer ^{a, b}, Raimund Lechner ^c

Zusammenfassung

Militäreinsätze in großen Höhen spielen in der militärischen Planung eine wichtige Rolle, weil etwa 85 % aller bewaffneten Konflikte weltweit in Gebirgsregionen stattfinden. Da die Einsatzkräfte in der Regel über ein großes Gebiet verteilt sind und die Mobilität erheblich eingeschränkt ist, bedeuten diese Einsätze eine große Herausforderung für die Logistik und die medizinische Versorgung. Die Behandlung der Höhenkrankheit muss in der Regel vor Ort unter sehr eingeschränkten Bedingungen erfolgen. Insbesondere das lebensbedrohliche Höhenlungenödem erfordert eine schnelle und adäquate Therapie. Die Verbesserung der Sauerstoffversorgung ist das primäre Ziel. Aber in militärischen Szenarien ist der Abstieg meist nicht möglich und hyperbare Kammern sowie Flaschensauerstoff sind oft nicht verfügbar.

Wir vergleichen in dieser Arbeit die Initialtherapie des Höhenlungenödems mittels Auto-PEEP (Positive End-Expiratory Pressure), einer speziellen Form der Ausatmung gegen die Lippenbremse, als einen alternativen

^a Universität Ulm, Abteilung Sport- und Rehabilitationsmedizin

^b Abteilung Allgemein- und Viszeralchirurgie der ADK-Klinik Blaubeuren

^c Bundeswehrkrankenhaus Ulm, Klinik X - Anästhesie, Intensivmedizin, Notfallmedizin und Schmerztherapie

Therapieansatz mit der Anwendung von Flaschensauerstoff bei zwei Patienten mit dieser Erkrankung. Dabei wurde die Sauerstoffsättigung mittels Pulsoxymetrie (SpO_2) im zeitlichen Verlauf gemessen. Bei beiden Patienten stieg die SpO_2 nach Beginn der Therapie deutlich von 65–70 % auf 95 % an. Oberhalb von 80 % war dieser Anstieg bei dem Auto-PEEP-Patienten langsamer als bei dem Flaschensauerstoff-Patienten.

Die leitlinienbasierten Therapieoptionen des Höhenlungenödems sind immer die Option der ersten Wahl – sofern verfügbar – und sollten so schnell wie möglich begonnen werden. Der Vorteil von Auto-PEEP ist die permanente Verfügbarkeit. Er verbessert den SpO_2 -Wert annähernd so gut wie Sauerstoff mit niedrigen Flussraten (1–3 l/min) und hat darüber hinaus einen positiven Effekt auf die Oxygenierung, der etwa 120 min nach Beendigung anhält. Die Auto-PEEP-Behandlung zeigt, zumindest in diesem Fallvergleich, keine Unterlegenheit gegenüber der Standard-Behandlung mit Flaschensauerstoff. Ihre sofortige Anwendung nach gestellter Verdachtsdiagnose spielt hierbei vermutlich eine wichtige Rolle.

Schlüsselworte: Militärische Einsätze im Gebirge, Höhenlungenödem, Auto-PEEP mit Lippenbremse, Pulsoxymetrie, Sauerstoffsättigung

Summary

Military missions at high altitude play a significant role in military planning, as approximately 85 % of all armed conflicts worldwide take place in mountainous regions. Since forces are typically deployed over a large area and mobility is considerably restricted these missions are major challenge for logistics and medical support. Treatment of altitude sickness usually must be performed on site under very limited conditions, and the life-threatening high-altitude pulmonary edema (HAPE) in particular requires rapid and adequate therapy. Improvement of oxygenation is the main therapy goal, but descending is often impossible and hyperbaric chambers, as well as bottled oxygen, are often not available. In two patients suffering from HAPE we compare Auto-PEEP (positive end-expiratory pressure; AP-Pat), a special kind of pursed lips breathing, as an alternative therapeutic approach to the application of bottled oxygen (O₂-Pat). Oxygen saturation was measured by pulse oximetry (SpO₂) over time. In both patients SpO₂ increased significantly from 65–70 % up to 95 %. Above 80 % this increase was slower in AP-Pat compared to O₂-Pat. therapy started immediately in AP-Pat but was delayed in O₂-Pat due of organizational and logistic reasons. If available, guideline-based therapy of HAPE is always the primary option and should be started as soon as possible. The advantage of Auto-PEEP is its all-time availability. It improves SpO₂ nearly as well as low rates of 1–3 l/min of oxygen and furthermore has a positive effect on oxygenation lasting for approximately 120 minutes after stopping. Auto-PEEP treatment does not appear inferior to oxygen treatment, at least in this cross-case comparison. Its immediate application after diagnosis probably plays an important role here.

Keywords: military missions in high altitude; acute mountain sickness; pursed lips breathing; expiratory positive airway pressure; oxygen saturation; pulse oximetry

Einleitung und Hintergrund

Militärische Auseinandersetzungen in Gebirgsregionen nehmen zu [15]. Nach einer Auswertung des US Army Research Institute of Environmental Medicine wurden 23 von 27 bewaffneten Konflikten im Jahr 2022 in Bergregionen ausgetragen [19]. Logistik sowie medizinische Versorgung sind im Gebirge äußerst herausfordernd und mitunter sind dort eingesetzte Truppenteile über längere Zeit auf sich gestellt (siehe Abbildung 1). Daher ist die Kenntnis höhentypischer Probleme sowie deren Therapiemöglichkeit vor Ort essenziell für alle Einheiten der Bundeswehr, die für derartige Einsatzszenarien in Frage kommen.

In der Vergangenheit haben wir mehrfach die besondere Anfälligkeit von Soldaten für die Höhenkrankheit thematisiert, die etwa doppelt so hoch ist wie bei zivilen Bergsteigern [22]. Insbesondere das Höhenlungenödem

(HAPE) erfordert eine schnelle und adäquate Therapie. HAPE lässt bis dahin völlig gesunde, leistungsfähige Personen bei zu schnellem Aufstieg lebensbedrohlich erkranken [2]. Es hat im Vergleich zur akuten Bergkrankheit (Acute Mountain Sickness: AMS) oder zum Höhenhirnödem (High Altitude Cerebral Edema: HACE) eine andere Pathophysiologie [13]. Der ausgeprägte Anstieg des pulmonalarteriellen Drucks (pulmonal arterial pressure: PAP), hervorgerufen durch hypoxiebedingte Vaskonstriktion (Euler-Liljestrand-Reflex) spielt hierbei die entscheidende Rolle [5]. Dies eröffnet zusätzliche Therapieoptionen mit dem Ziel, den PAP zu senken. Bis heute ist Nifedipin retard das Notfallmedikament der Wahl. Dexamethason ist nachgewiesenermaßen ebenfalls wirksam, wohingegen Phosphodiesteraseinhibitoren (Sildenafil, Tadalafil) die in sie gesetzten Erwartungen bislang nicht erfüllt haben [14]. Jegliche medikamentöse Therapie ist Off-Label-Use, da alle diese Wirkstoffe keine pharmazeutische Zulassung für die Indikation „HAPE“ bzw. „Höhenkrankheit“ haben.

Da das HAPE primär durch Hypoxie ausgelöst wird, ist die Verbesserung der Sauerstoffversorgung des Organismus auch die Therapieoption der Wahl. Allgemein wird empfohlen bei Höhenerkrankungen, bis zur letzten asymptotischen Schlafhöhe, mindestens jedoch um 500 Höhenmeter abzustiegen [12]. Das ist allerdings häufig aus organisatorischen Gründen (schwieriges Gelände, Infrastruktur, schlechtes Wetter, Nacht, Transportmöglichkeiten) schwer umzusetzen oder es scheitert an der schlechten Verfassung des Patienten. In militärischen Szenarien ist ein Abstieg auf Grund taktischer Vorgaben und der Bedrohungslage nochmals deutlich schwieriger realisierbar. Weitere Optionen zur Verbesserung der Sauerstoffversorgung sind die Verwendung eines Überdrucksacks oder die Verabreichung von Flaschensauerstoff [3]. Dafür müssen diese jedoch vor Ort verfügbar sein, d. h. sie müssen mittransportiert werden.

Daher wollen wir in der vorliegenden Arbeit eine einfache und jederzeit anwendbare spezielle Form der Ausatmung mit Lippenbremse (Auto-PEEP: Positive end-expiratory pressure) [23, 24] mit der Anwendung von Flaschensauerstoff für die Initialtherapie bei zwei Patienten mit HAPE vergleichen.

Material and Methode

Wir vergleichen bei zwei an HAPE erkrankten Patienten den Effekt von Auto-PEEP auf die pulsoxymetrisch gemessene periphere Sauerstoffsättigung (SpO₂) mit dem Effekt von Sauerstoffgabe. Auto-PEEP ist eine spezielle Atemtechnik, die wir bereits früher beschrieben haben [24]. Dabei wird kontrolliert über 2 s tief eingeatmet und anschließend über 8 s gegen den Widerstand der nahezu geschlossenen Lippen (Lippenbremse) so ausgeatmet, dass der Atemstrahl in 30 cm Entfernung auf dem Handrücken spürbar ist.

Nach der Expedition haben wir den Druck bei diesem Atemmanöver in der Mundhöhle mit piezo-resistiven Sensoren (MIPM Mammendorf) bestimmt und konnten zeigen, dass mit Auto-PEEP intraoral Druckwerte von etwa 55 cm Wassersäule (min 40, max 65 cm H₂O) erreicht werden. Da die Stimmbänder während der Auto-PEEP-Atmung offen sind, folgern wir, dass der intrathorakale Druck ebenfalls im Bereich von 55 cm H₂O liegt. In beiden Fällen verwendeten wir als Pulsoxymeter das Nonin PalmSat 2500® (Nonin, USA) mit dem flexiblen wiederverwendbaren Fingersensor (Adult Flexi-Form 9000A), welcher am Zeigefinger angelegt wurde, um die SpO₂ anzuzeigen. Dieses Gerät speichert die Daten von SpO₂ und Puls alle 4 s und hat eine Speicherkapazität von 72 h. Die Daten wurden auf ein Laptop überspielt und ausgewertet (Abbildung 2).

Patient mit O₂-Applikation (O₂-Patient)

Der erste Patient (männlich, 55 Jahre alt und ein sehr erfahrener Ultra-Marathon-Läufer) erkrankte während eines Trekkings zum Mera Peak (6461 m) in der Everest Region in Nepal an HAPE. Während des Anstiegs zum Hochlager des Mera Peaks am 9. Tag des Trekkings in einer Höhe von etwa 5000 m und höher konnte er dem Rest der Gruppe nicht mehr folgen. Bis dahin war er völlig problemlos aufgestiegen und immer im oberen Leistungsbereich der Gruppe gelegen. Zusätzlich zu diesem plötzlichen Leistungsabfall beklagte er Halluzinationen. Da das Gelände leicht, die Wegfindung eindeutig und Tageslicht noch für mehrere Stunden verfügbar war, drehte er kurz hinter dem Mera La Pass auf etwa 5450 m um und stieg allein bis zur letzten Unterkunft mit festen Gebäuden in Karre (4870 m) ab. Die restliche Gruppe

bestieg den Mera Peak und kehrte am nächsten Morgen ebenfalls nach Karre zurück. Der Gesundheitszustand des Patienten hatte sich subjektiv zwischenzeitlich etwas gebessert und der Appetit zugenommen, aber er fühlte sich nach wie vor schwach.

Spät am Abend kam es zu einer erneuten plötzlichen Atemnot. Die selbst bestimmte SpO₂ lag zwischen 40 und 50 %, wie er am nächsten Tag berichtete. Er führte eine Selbsttherapie mit inhalativen Sympathomimetika und Kortikosteroiden durch, welche nur eine geringe Verbesserung bewirkte. Nach einer ruhelosen Nacht hatte sich der Zustand des Patienten nicht gebessert, weshalb zwei Ärzte, die ebenfalls in Karre waren, hinzugezogen wurden. Die SpO₂ unter Umgebungsluft lag bei 62 % mit schwacher Signalqualität und der Patient beklagte erhebliche Dyspnoe. Sein Lake Louise Score (LLS) [18] betrug 10 (schwerste Kopfschmerzen: 3, Appetitlosigkeit: 1, schwerste Schwäche: 3, leichter Schwindel: 1, AMS Funktionsscore: 2). Ein HAPE wurde suspekt und gemeinsam mit dem Führer der Gruppe wurde entschieden, den Patienten so schnell wie möglich in tiefere Lagen zu evakuieren. Während der Planung des Abtransports wurde Flaschensauerstoff organisiert. Ein Überdrucksack war nicht vorhanden.

In der Zwischenzeit wurde der Patient in der Auto-PEEP-Atmung instruiert und er versuchte diese anzuwenden. Auf Grund der situativ bedingten Agitation und Verunsicherung konnten die Anweisungen aber nicht wirksam umgesetzt werden. Diese Atemversuche können deshalb nicht als Auto-PEEP wie oben beschrieben, sondern lediglich als Ausatmung gegen eine minimale Lippenbremse (pursed lips breathing – PLB) bezeichnet werden. Erschöpfungsbedingt konnte jedoch selbst dieses PLB



Abb. 2: Alpinist auf dem Gipfel des Yasghil Sar (6013 m), Pakistan bei der Messung der SpO₂ mit dem Pulsoxymeter Nonin Palm Sat 2500® (Bild: Markus Tannheimer)

nicht durchgehend praktiziert werden, weshalb der Therapieversuch beendet wurde. Glücklicherweise war fünf Minuten später Flaschensauerstoff verfügbar. Die initiale Flussrate des Flaschensauerstoffs betrug für wenige Minuten 3 l/min, welche dann auf einen konstanten Fluss von 0,5–1 l/min reduziert wurde. Dies bewirkte einen stetigen Anstieg der SpO₂ von initial <70 % auf >95 % (Abbildung 3). Zudem erhielt der Patient initial 8 mg Dexamethason, 20 mg Nifedipin retard und 800 mg Ibuprofen als orale Therapie.

Patient mit Anwendung von Auto-Peep (AP-Pat)

Der zweite Patient (männlich, 33 Jahre alt, ein erfahrener Bergsteiger in den europäischen Alpen) wollte den Denali (6 198 m) in Alaska besteigen. Nach dem Flug von Talkeetna (359 m) auf den Gletscher (2 100 m) stieg er innerhalb von 4 Tagen auf 4 380 m auf (1. Tag bis 2 400 m, 2. Tag bis 3 300 m, 3. Tag Gepäcktransport auf 4 380 m und Abstieg zurück auf 3 300 m für die Nacht, 4. Tag Aufstieg und Verbleib auf 4 380 m) und transportierte dabei schwere Lasten. Dort litt er unter einem beginnenden HAPE mit erheblichem Abfall der körperlichen Leistungsfähigkeit und Dyspnoe. Sein LLS lag bei 11 (schwerster Kopfschmerz: 3, mittlere Übelkeit: 2, ausgeprägte Schwäche: 2, mittlerer Schwindel: 2; AMS Funktions-score: 2). Seine SpO₂ war 62 % (59–65 %), was niedrig im Vergleich zu den Ergebnissen von ROACH et al. ist, die eine mittlere SpO₂ von 81,5 ± 4,4 % bei 102 gesunden Bergsteigern am gleichen Ort beschreiben [17]. In dieser Höhe befindet sich das vorgeschobene Basislager (Ad-

vanced Base camp, ABC), welches gelegentlich auch "Rangers Camp" genannt wird, mit Funkverbindung zur Nationalparkverwaltung.

Als die Symptome am späten Nachmittag einsetzten, verblieb die Gruppe an diesem Ort mit minimaler Infrastruktur. Der Patient führte selbständig Auto-PEEP in liegender Position mit leicht erhöhtem Oberkörper (~15°) wie oben beschrieben jeweils über 30 min durch, gefolgt von 2 h normaler Atmung ohne irgendwelche Vorgaben, bevor er erneut mit Auto-PEEP begann. Sowohl der Patient wie auch der betreuende Arzt überwachten dabei kontinuierlich die SpO₂ auf dem Display des Pulsoxymeters. Nifedipin retard, Dexamethason und Azetazolamid waren verfügbar, wurden aber nicht verwendet.

Ergebnisse

Unmittelbar nach Verabreichung von Flaschensauerstoff stieg die SpO₂ des O₂-Pat innerhalb von 2 min von ~64 % auf 97 % an (Abbildung 3). Etwa 1 h nach Therapiebeginn (und 30 min nach Gabe von O₂), wurde er mit dem Hubschrauber nach Lukla (2 860 m) zu einer ersten Untersuchung evakuiert. Mehrere Stunden später wurde der Patient in ein Krankenhaus in Kathmandu, ebenfalls per Hubschrauber, weiterverlegt. Die dortige körperliche Untersuchung ergab keine pathologischen Befunde, im Röntgen-Thorax zeigte sich eine bilaterale bronchovaskuläre Zeichnungsvermehrung; sowohl Blut- als auch Urinuntersuchung waren unauffällig. Der Zustand des Patienten verbesserte sich schnell und er fühlte sich am Abend des gleichen Tages subjektiv gesund.

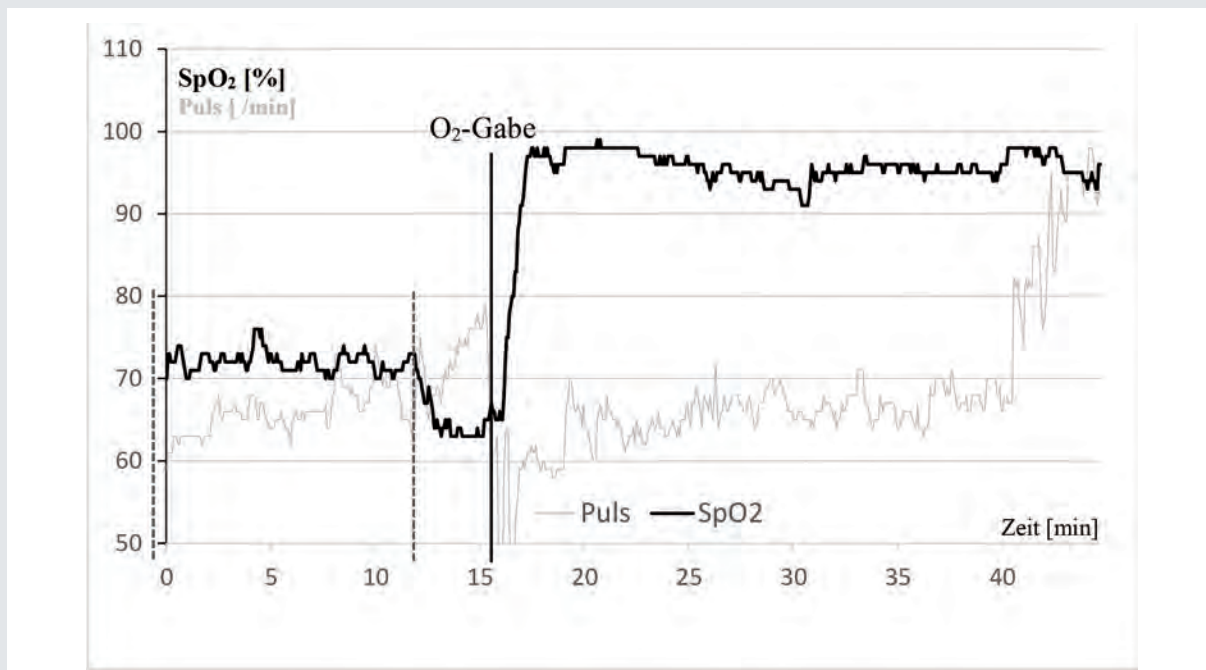


Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der peripheren Sauerstoffsättigung (SpO₂; schwarz) und des Pulses (grau) des O₂-Patienten in 4870 m. Die schwarze durchgängige Linie markiert den Beginn der Sauerstoffgabe mit einer anfänglichen Flussrate von 3,0 l/min, welche nach einigen Minuten auf 0,5–1,0 l/min reduziert wurde. Die gestrichelten Linien zeigen die Zeitspanne des nicht adäquat durchführbaren und damit ineffizienten Auto-PEEP-Versuchs, welcher wegen Erschöpfung nach 12 min beendet werden musste. Zum Zeitpunkt „40 min“ geht der Patient zum Hubschrauber (ansteigender Puls) immer noch mit Sauerstoffgabe. Die Messung endet mit Besteigen des Hubschraubers.

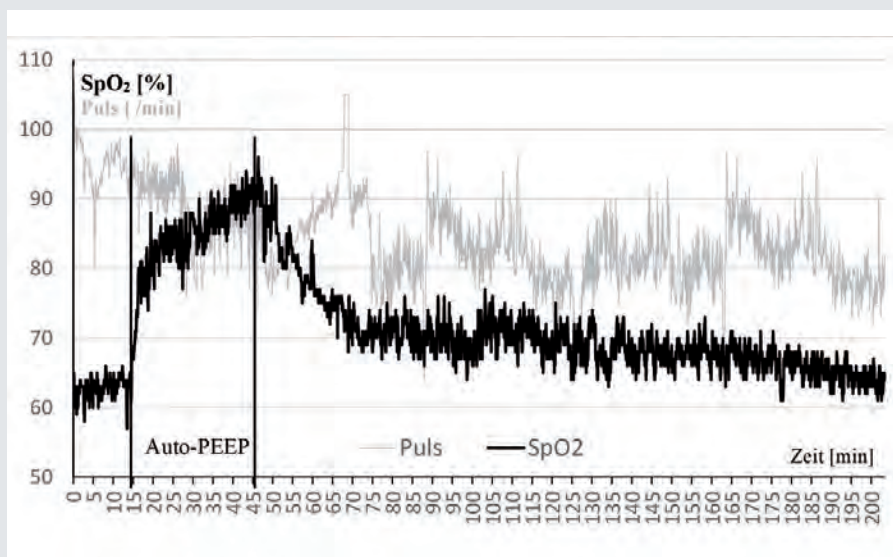


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der SpO₂ (schwarz) und des Pulses (grau) des AP-Patienten in 4380m: Die schwarzen Linien markieren den Beginn und das Ende der Auto-PEEP-Atmung.

Drei Tage später wurde er in gutem Gesundheitszustand entlassen.

Die SpO₂ des AP-Pat stieg unmittelbar nach Beginn der Auto-PEEP-Atmung von <65 % auf ~80 % mit einem anschließend langsameren Anstieg bis auf 95 % am Ende der Auto-PEEP-Periode (Abbildung 4). Interessanterweise blieb zwei Stunden nach Beendigung von Auto-PEEP seine SpO₂ deutlich höher und der Puls niedriger im Vergleich zu den Ausgangswerten.

Über die Nacht erholte sich der AP-Pat so gut, dass er am nächsten Tag im Bereich des ABC herumlaufen und bis in eine Höhe von 4850 m aufsteigen konnte, sein LLS fiel auf 6. Er führte kein weiteres Auto-PEEP durch und einen weiteren Tag später war er in der Lage, die sogenannte Headwall des West Buttress Grates (5050 m) zu besteigen. Vier Tage nach Durchführung des Auto-PEEP erklimmte er mit seiner Ehefrau den Gipfel des Denali (6190 m), mit Start im ABC (4330 m) und Rückkehr dort hin innerhalb eines Tages, ohne Nutzung eines Hochlagers in 5200 m.

Zusammenfassend zeigten beide Patienten einen deutlichen Anstieg der SpO₂ unmittelbar nach Therapiebeginn. Der initiale Anstieg auf ein SpO₂-Niveau von ~80 % innerhalb weniger Minuten ist bei beiden Patienten ähnlich. Bei dem O₂-Pat setzte sich der steile Anstieg der Sauerstoffsättigungskurve fort, während beim AP-Pat der weitere Anstieg langsamer erfolgte. Beide Patienten erreichten maximal SpO₂-Werte von 95 %. Bemerkenswert ist der langsame Abfall der SpO₂ nach Beendigung der Auto-PEEP-Atmung bei dem AP-Pat.

Diskussion

Der Anstieg der SpO₂ ist bei beiden Patienten vergleichbar ausgeprägt, aber sie unterscheiden sich in mehreren Punkten.

Vergleich der Ausgangssituationen

Die Höhe, in der das HAPE auftrat, ist bei dem O₂-Pat größer (5450 m vs. 4330 m). Grundsätzlich würde man ein höheres Risiko und einen höheren Schweregrad des HAPE in einer größeren Höhe erwarten. Aber die Auswirkung des Höhenunterschieds von 1120 m relativiert sich aus mehreren Gründen.

Erstens ist die unmittelbare Auswirkung der Maximalhöhe von 5450 m für den O₂-Pat nur von sehr kurzer zeitlicher Dauer, da er den Mera La Pass nur erreichte und unmittelbar anschließend nach Karre auf 4870 m abstieg.

Zweitens ist die Atmosphäre unterschiedlich dick und der Luftdruck ist in der Nähe des Polarkreises (63° nördliche Breite), wo sich der Denali befindet, in gleicher atmosphärischer Höhe niedriger und damit die physiologische Höhe größer, als in der Everest Region (28° nördliche Breite) [11, 27]. Auf der Höhe des ABC am Denali beträgt der barometrische Druck 440±2 mmHg [8], welcher in der Nähe des Everest einer Äquivalenzhöhe von 4600 m entspricht [11]. Hieraus resultiert ein Unterschied der "physiologischen" Höhe von nur noch 270 m.

Drittens sind die Höhenprofile der beiden Patienten unterschiedlich. Der O₂-Pat brauchte 9 Tage um die Höhe, in der er an HAPE erkrankte, zu erreichen – im Gegensatz zu 4 Tagen beim AP-Pat. Auf Grund eines ungenügenden Akklimatisationsprozesses steigt bei schnellem Aufstieg das Risiko an HAPE zu erkranken [1]. Berücksichtigt man dies, müsste das Akklimatisationsprofil des O₂-Pat besser und eher protektiv hinsichtlich des Risikos für HAPE gewesen sein. Hinzu kommt, dass der AP-Pat mehr als 50 kg mit Schlitten und Rucksack zu transportieren hatte, da am Denali große Mengen an Ausrüstung, unter anderem Brennstoff und Nahrung, für die gesamte Expedition von den Bergsteigern selbst transportiert werden müssen. Neben schnellem Aufstieg ist schwere körperliche

Arbeit ein bekannter Risikofaktor für die Entwicklung eines HAPE [16, 21].

Vergleicht man beide Patienten mit ihrem gesamten Risikoprofil inklusive ihrer Fitness, ist deren Ausgangssituation ähnlich.

Ein relevanter Unterschied besteht hinsichtlich ihres Alters. Die bestehende Altersdifferenz von 22 Jahren könnte eine unterschiedliche Regenerationsfähigkeit bewirken, wenngleich jüngere Menschen anfälliger für ein HAPE sind [4, 9]. Auch bezüglich einer AMS ist die Inzidenz und der Schweregrad bei jungen Personen höher [6, 25]. Zusätzlich könnte eine individuell andere Risikoanfälligkeit für HAPE/AMS vorliegen, die jedoch nicht verlässlich quantifiziert werden kann.

Vergleich der Therapien

Der bedeutendste Unterschied jedoch besteht in der unterschiedlichen Therapie und dem Beginn derselben. Der Abstieg von O₂-Pat entspricht den generellen Empfehlungen zur Therapie der Höhenkrankheit und ein Abstieg um 600 m liegt innerhalb dieser Empfehlungen [11]. Dementsprechend erholte sich O₂-Pat anfänglich, aber die Symptome verschlimmerten sich wieder. Retrospektiv gesehen waren die 600 m Abstieg nicht ausreichend [11] und machten eine weitere Therapie erforderlich, die in ihrer Gesamtheit jedoch erst sehr verzögert begann. Die Medikation mit inhalativen Sympathomimetika und Kortikosteroiden wird bei höhenassoziierten Erkrankungen in aktuellen Leitlinien nicht empfohlen [12].

Zusammenfassend fand eine effektive Therapie der sich erneut verschlimmernden Symptomatik erst mit dem Hinzuziehen der beiden Ärzte nach ungefähr 12 h statt. Diese bestimmten eine SpO₂ von 62 %, was erheblich höher als die vom Patienten selbst gemessene war. Dieser Wert ist ähnlich wie der des AP-Pat (58–64 %). Die Behandlung mit Dexamethason und Nifedipin retard ist effektiv bei HAPE [11, 14], Ibuprofen wirkt nur gegen Kopfschmerz. Aus pharmakokinetischer Sicht ist es unwahrscheinlich, dass sich diese oral verabreichte und teilweise retardierte Medikation auf die hier vorgestellte SpO₂-Verlaufskurve bis zur Hubschrauberevakuierung (Abbildung 3) relevant auswirken konnten.

Das PLB hatte bei dem O₂-Pat einen deutlich geringeren Effekt als Auto-PEEP bei dem AP-Pat. Ursächlich ist, dass der O₂-Pat schlichtweg nicht in der Lage war, die Auto-PEEP Atmung vollumfänglich korrekt durchzuführen, da er die Anweisungen nicht umsetzen konnte. Außerdem war er zu erschöpft für diese anstrengende Atemprozedur, wie der bei ihm ansteigende Puls während des PLB verdeutlicht, mitverursacht wahrscheinlich durch den verzögerten Beginn einer effektiven Therapie. Eine zu große HAPE-bedingte Diffusionsbarriere, die sich in der Zwischenzeit entwickelt hatte, könnte den Effekt des Auto-PEEPs zudem reduziert haben.

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, ist die Gabe von Flaschensauerstoff hinsichtlich der SpO₂ eine sehr effektive

Therapie für ein HAPE. Eine Sauerstoffgabe ist daher auch eine empfohlene Möglichkeit, die Zeit bis zum oft schwierig zu organisierenden Abstieg oder Abtransport zu überbrücken und diesen ebenfalls durch Sauerstoffgabe zu unterstützen [11].

Im Gegensatz dazu konnte die Therapie beim AP-Pat unmittelbar nach Diagnosestellung des HAPE begonnen werden. Ein Abstieg zum letzten Lager war während der Nacht wegen des schwierigen und objektiv gefährlichen Geländes unmöglich. Da sich der AP-Pat gut während der Auto-PEEP-Therapie erholte, war keine zusätzliche medikamentöse Therapie erforderlich, obwohl Nifedipin retard sowie auch Dexamethason verfügbar waren.

Bewertung der Therapien

Es gibt mehrere anekdotische Berichte, wie ein positiver Atemwegsdruck wirksam in der Therapie von HAPE eingesetzt wurde, sogar vom gleichen Ort am Denali [10, 20]. Jedoch gibt es keine Berichte über einen ähnlich langanhaltenden Effekt über 2 h, wie wir ihn bei dem AP-Pat beobachten konnten. Die in den anderen Fällen verwendeten PEEP-Drücke waren zudem alle deutlich geringer (im Bereich von 10 cm H₂O) und wurden durch Atmung mit einer CPAP-Maske (continuous positive airway pressure) durchgeführt. Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass die 3 gesunden begleitenden Bergsteiger des AP-Pat bei der gemeinsamen Durchführung des Auto-PEEP einen vergleichbaren Anstieg der SpO₂ aufwiesen – abgesehen von der Tatsache, dass sie von einem deutlich höheren SpO₂-Niveau (Median 78 %) starteten. Der auffallende Unterschied zum AP-Pat war, dass deren SpO₂ nach Beendigung der Auto-PEEP-Atmung jedoch rasch wieder auf das, im Vergleich zum Auto-PEEP Patienten jedoch höhere Ausgangsniveau abfiel. Dies macht eine, durch den hohen Auto-PEEP-Druck bedingte, strukturelle Verbesserung der pulmonalkapillären Sauerstoffdiffusion beim HAPE sehr wahrscheinlich. Am ehesten ist eine Verringerung eines interstitiellen bzw. alveolären Ödems, sowie eine Verringerung von Atektasen und eine konsekutiv reduzierte hypoxische pulmonale Vasokonstriktion ursächlich hierfür. Wir haben dies detaillierter bereits in unserer früheren Veröffentlichung diskutiert [24]. Auch weitere Studien beschreiben eine deutliche Verbesserung bei HAPE- oder AMS-Patienten durch CPAP und bilevel positive airway pressure (BiPAP) (Be)atmung [7, 26]. Diese bestätigen zwar ebenfalls die gute Wirksamkeit eines erhöhten Atemwegsdrucks in der Therapie des HAPE, hierfür wird aber wiederum spezielle Ausrüstung benötigt, weshalb sie den gleichen Einschränkungen bei der vor-Ort-Therapie wie mit Flaschensauerstoff oder Überdrucksack unterliegen [12].

Auch wenn Auto-PEEP-Atmung anstrengend ist, hat der AP-Pat offenkundig gesamtheitlich stark von der verbesserten Sauerstoffversorgung profitiert, denn sein Puls sank während der Auto-PEEP-Atmung ab und war auch

anschließend niedriger als die Ausgangswerte (Abbildung 4). Dies ist in Übereinstimmung mit der Studie von SCHOENE et al., die eine konstante bis tendenziell niedrigere Herzfrequenz bei HAPE-Patienten während PEEP-Atmung zusätzlich zum Anstieg der SpO₂ beschreiben [20]. Im Gegensatz dazu steigen bei gesunden Probanden während PEEP-Atmung die SpO₂ und die Herzfrequenz an. Die Autoren schlussfolgern, dass HAPE-Patienten überproportional stark von der durch PEEP-Atmung verbesserten Oxygenierung profitieren, bei gesunden Personen dieser positive Effekt aber durch die verstärkte Atemarbeit egalisiert wird. Daher scheinen gesunde Bergsteiger stärker von einer Hyperventilation als von einer PEEP-Atmung zu profitieren.

Folgerungen

Basierend auf unseren Ergebnissen empfehlen wir die Auto-PEEP Atmung, die keine Ausrüstung benötigt, einfach zu erlernen und zudem überall anwendbar ist, bei Patienten mit AMS oder HAPE alle 2 h über 30 min durchzuführen. Begonnen werden sollte damit, sobald HAPE oder eine schwere AMS vermutet wird. Eine Überwachung des exakten zeitlichen Rhythmus (2 s Einatmung, 8 s Ausatmung) ist sinnvoll, um eine Hyperventilation zu vermeiden. Ein pulsoxymetrisches Monitoring dieser kranken Personen sowie auch des Therapieerfolgs ist empfehlenswert. Der parallel zur SpO₂ angezeigte Puls dient dabei als Indikator einer möglichen Überanstrengung, d. h. eines eingeschränkten Benefits der Auto-PEEP-Therapie [20]. Falls der Puls während der Auto-PEEP-Atmung ansteigt, sollte der Ausatemdruck reduziert werden, z. B. in der Art, dass der Luftstrahl der ausgeatmeten Luft gerade noch in 20 cm auf dem Handrücken gefühlt werden kann. Sollte die Pulserhöhung persistieren, insbesondere wenn dies mit einem Überanstrengungsgefühl verbunden ist, dann sollte Auto-PEEP beendet werden.

Limitationen

Die wesentlichsten Einschränkungen dieser Arbeit sind, dass zwei Individuen verglichen werden und dass die Umstände zwar vergleichbar, aber nicht identisch sind. Daher lassen sich aus diesen Einzelfallbeobachtungen keine allgemeingültigen Schlussfolgerungen ziehen. In abgelegenen Gebieten wird die Diagnose eines HAPE anhand des klinischen Befundes mit dem Leitsymptom des plötzlichen Leistungsabfalls gestellt. Weitere Symptome wie Dyspnoe, ein hoher LLS oder eine niedrige SpO₂ werden oft zusätzlich beobachtet, aber keines ist 100 %ig beweisend für das Vorliegen eines HAPE. Auf Grund der vorliegenden Symptome, den typischen Anamnesen, den Höhenprofilen und den Krankheitsverläufen, lag bei beiden Patienten mit größter Wahrscheinlichkeit ein HAPE vor. Selbst wenn sie nur an einer schweren AMS erkrankt wären, welche durch ihren LLS-Score zweifelsfrei belegt ist, wäre die erfolgte Behand-

lung (mit Ausnahme der Nifedipingabe bei dem O₂-Pat) identisch gewesen.

Die aufgezeichneten Intervalle der SpO₂ (Abbildungen 3 und 4) sind unterschiedlich lang, 45 min beim O₂-Pat und 205 min beim AP-Pat. Daher können wir keine Aussage über die Nachhaltigkeit des SpO₂-Anstiegs nach Beendigung der Sauerstoffgabe im Hubschrauber bei dem O₂-Pat treffen, so wie wir dies bei AP-Pat über weitere zwei Stunden beobachten konnten. Selbst haben wir nach Beendigung einer Sauerstoffgabe noch nie einen Langzeiteffekt beobachtet und haben hierzu auch keine Studien gefunden.

Fazit

Der rasche Beginn einer suffizienten Therapie, sobald HAPE vermutet wird, ist entscheidend. Der primäre Fokus aller therapeutischen Maßnahmen ist es, die Sauerstoffversorgung zu verbessern. Aber dies scheitert oft durch organisatorische (Problematik des Abstiegs) oder logistische (Verfügbarkeit eines Überdrucksacks oder von Flaschensauerstoff) Gründen und führt zu einer verzögerten Therapie. Die Auto-PEEP Therapie ermöglicht hingegen einen sofortigen Therapiebeginn mit unmittelbarem Anstieg der SpO₂ und zeigte eine vielversprechende Verbesserung des klinischen Befindens, auch nach Beendigung der Therapie. Wir empfehlen Auto-PEEP alle 2 Std über 30 min durchzuführen, solange bis sich der Patient erholt hat oder ergänzend zur leitliniengerechten HAPE Therapie.

Kernaussagen

- **Soldaten sind besonders anfällig für die Höhenkrankheit.**
- **Das Höhenlungenödem bedarf der unmittelbaren Therapie.**
- **Etablierte Therapien sind mitunter schwierig durchzuführen.**
- **Auto-PEEP ist überall und jederzeit anwendbar.**
- **Bei Überanstrengung (ansteigender Puls) soll zunächst der Ausatemdruck reduziert, bei Persistenz Auto-PEEP beendet werden.**

Glossar

ABC	advanced basecamp; vorgeschobenes Basislager
AMS	acute mountain sickness; akute Bergkrankheit
AP-Pat	Patient, der Auto-PEEP durchführte
Auto-PEEP	das vorgestellte Atemmanöver gegen die Lippenbremse

BiPAP	bilevel positive airway pressure; druckkontrollierte Beatmung – kombiniert mit Spontanatmung
CPAP	continuous positive airway pressure; kontinuierlicher Atemwegsüberdruck
HACE	high altitude cerebral edema; Höhenhirn-ödem
HAPE	high altitude pulmonary edema; Höhenlungen-ödem
LLS	Lake Louise Score; Fragebogen zur Quantifizierung der Höhenkrankheit
O ₂ -Pat	Patient, der Flaschensauerstoff erhielt
PAP	pulmonal arterial pressure
PLB	pursed lips breathing; Ausatmung gegen die Lippenbremse
SpO ₂	periphere kapilläre Sauerstoffsättigung

Literatur

- Bärtsch P: High altitude pulmonary edema. *Respiration* 1997; 64(6): 435–443.
- Bärtsch P, M Maggiorini, H Mairbaurl, P Vock and ER Swenson: Pulmonary extravascular fluid accumulation in climbers. *Lancet* 2002; 360(9332): 571; author reply 571–572.
- Bärtsch P, B Merki, D Hofstetter, et al.: Treatment of acute mountain sickness by simulated descent: a randomised controlled trial. *BMJ* 1993; 306(6885): 1098–1101.
- Basnyat B, J Hargrove, PS Holck, et al.: Acetazolamide fails to decrease pulmonary artery pressure at high altitude in partially acclimatized humans. *High Alt Med Biol* 2008; 9(3): 209–216.
- Dehnert C, MM Berger, H Mairbaurl and P Bärtsch: High altitude pulmonary edema: a pressure-induced leak. *Respir Physiol Neurobiol* 2007; 158(2–3): 266–273.
- Gaillard S, Dellasanta P, Loutan L, Kayser B: Awareness, prevalence, medication use, and risk factors of acute mountain sickness in tourists trekking around the Annapurnas in Nepal: a 12-year follow-up. *High Alt Med Biol* 2004; 5(4): 410–419.
- Gregorius DD, Dawood R, Ruh K, Nguyen HB: Severe high altitude pulmonary oedema: a patient managed successfully with non-invasive positive pressure ventilation in the Emergency Department. *Emerg Med J* 2008; 25(4): 243–244.
- Hackett PH, Roach RC, Harrison GL, Schoene RB, Mills Jr MJ.: Respiratory stimulants and sleep periodic breathing at high altitude. Almitrine versus acetazolamide. *Am Rev Respir Dis* 1987; 135(4): 896–898.
- Hundt N, Apel C, Bertsch D, et al.: Variables Influencing the Pressure and Volume of the Pulmonary Circulation as Risk Factors for Developing High Altitude Pulmonary Edema (HAPE). *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2022; 19(21): 13887.
- Larson EB: Positive airway pressure for high-altitude pulmonary oedema. *Lancet* 1985; 1(8425): 371–373.
- Luks A, Ainslie PN, Lawley JS, Roach RC and Simonson TS: Ward, Milledge & West's High altitude medicine and physiology 6E. Boca Raton: CRC Press 2021; 29–32, 418–424, 429–430.
- Luks AM, Auerbach PS, Freer L, et al.: Wilderness Medical Society Clinical Practice Guidelines for the Prevention and Treatment of Acute Altitude Illness: 2019 Update. *Wilderness Environ Med* 2019; 30(4S): S3–S18.
- Luks AM, Swenson ER, Bärtsch P: Acute high-altitude sickness. *Eur Respir Rev* 2017; 26(143): 1–14.
- Maggiorini M, Brunner-La Rocca HP, Peth S, et al.: Both tadalafil and dexamethasone may reduce the incidence of high-altitude pulmonary edema: a randomized trial. *Ann Intern Med* 2006; 145(7): 497–506.
- Pierce SW: Mountain and Cold Weather Warfighting: Critical Capability for the 21st Century, School of Advanced Military Studies United States Army Command and General Staff College 2008.
- Rashid H, Hashmi SN, Hussain T: Risk factors in high altitude pulmonary oedema. *J Coll Physicians Surg Pak* 2005; 15(2): 96–99.
- Roach RC, Greene ER, Schoene RB, Hackett PH: Arterial oxygen saturation for prediction of acute mountain sickness. *Aviat Space Environ Med* 1998; 69(12): 1182–1185.
- Roach RC, Hackett PH, Oelz O, et al.: The 2018 Lake Louise Acute Mountain Sickness Score. *High Alt Med Biol* 2018; 19(1): 4–6.
- Rock PB: Mountains and military medicine: an overview. Washington DC: Office of the Surgeon General, Department of the Army 2002; 613–619.
- Schoene RB, Roach RC, Hackett PH, Harrison G, Mills Jr WJ: High altitude pulmonary edema and exercise at 4,400 meters on Mount McKinley. Effect of expiratory positive airway pressure. *Chest* 1985; 87(3): 330–333.
- Swenson ER, Bärtsch P: High-altitude pulmonary edema. *Compr Physiol* 2012; 2(4): 2753–2773.
- Tannheimer M, Albertini N, Ulmer H, et al.: Testen des individuellen Höhenkrankheitsrisikos vor militärischen Einsätzen in großer Höhe. *Wehrmed Mschr* 2011; 55: 58–62.
- Tannheimer M, Lechner R: Initial Treatment of High-Altitude Pulmonary Edema: Comparison of Oxygen and Auto-PEEP. *Int J Environ Res Public Health* 2022; 19: 16185.
- Tannheimer M, Ried S, Thomas A, Gerngroß H: Einfache Selbsttherapie bei höhenbedingter Hypoxie durch Auto-PEEP-Atmung. *WMM* 2004; 48(11–12): 225–229.
- Wagner DR, D'Zatko K, Tatsugawa K, et al.: Mt. Whitney: determinants of summit success and acute mountain sickness. *Med Sci Sports Exerc* 2008; 40(10): 1820–1827.
- Walmsley M: Continuous positive airway pressure as adjunct treatment of acute altitude illness. *High Alt Med Biol* 2013; 14(4): 405–407.
- West JB: High-altitude medicine. *Am J Respir Crit Care Med* 2012; 186(12): 1229–1237.

Interessenkonflikt: Die Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt gem. International Committee of Medical Journals Editors besteht. Diese Studie wurde in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt. Alle in diese Studie involvierten Personen haben ihr, sowie deren Publikation zugestimmt.

Manuskriptdaten

Zitierweise

Tannheimer M, Lechner R: Vor-Ort-Therapie des Höhenlungenödems: Vergleich von Flaschensauerstoff und PEEP-Atmung mit Lippenbremse. *WMM* 2023; 67(4): 117–124.

DOI: <https://doi.org/10.48701/opus4-118>

Für die Verfasser

Oberfeldarzt d. R. Priv.-Doz Dr. Markus Tannheimer
Abteilung Allgemein- und Visceralchirurgie
ADK-Klinik Blaubeuren
Ulmer Str. 26, 89143 Blaubeuren
E-Mail: m.tannheimer@adk-gmbh.de

Manuscript Data

Citation

Tannheimer M, Lechner R: [On-Site therapy of high-altitude pulmonary edema: comparison of application of bottled oxygen versus auto-PEEP by pursed lips breathing]. *WMM* 2023; 67(4): 117–124.

DOI: <https://doi.org/10.48701/opus4-118>

For the Authors

Lieutenant Colonel (MC Res)
Associate Professor Dr. Markus Tannheimer
Department of Surgery at the ADK Hospital Blaubeuren
Ulmer Str. 26, D- 89143 Blaubeuren
E-Mail: m.tannheimer@adk-gmbh.de