

Martin I. Radwin, M.D., Colin K Grissom, M.D.,  
Mary Beth Scholand, M.D., Chris H. Harmston, MSE

## ***Aufrechterhaltung der Oxygenierung und Ventilation während einer experimentellen Schneeeingrabung durch Ableitung des ausgeatmeten Kohlendioxids***

*Normal Oxygenation and Ventilation during Snow Burial by the  
Exclusion of Exhaled Carbon Dioxide*

### **SUMMARY**

*Objective:* To confirm that the accumulation of exhaled carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is the principle cause of non-mechanical asphyxiation during avalanche burial by demonstrating that complete exclusion of exhaled CO<sub>2</sub> during experimental snow burial results in normal oxygenation and ventilation utilizing the air within the snowpack.

*Methods:* In the experimental group, 8 healthy volunteers (mean age 32 years, range 19–44 years) were fully buried up to 90 minutes in compacted snow with a density ranging from 300–680 kg/m<sup>3</sup> at an elevation of 2385 m. The 6 men and 2 women breathed directly from the snow utilizing a device containing no air pocket around the inhalation intake in addition to an extended exhalation tube running completely out of the snowpack to remove all exhaled carbon dioxide. Continuous physiologic monitoring included oxygen saturation and end-tidal CO<sub>2</sub>. As controls, 5 of the 8 subjects repeated the study protocol breathing directly into a small fist-sized air pocket with no carbon dioxide removal device.

*Results:* In the experimental group, the mean burial time was 88 minutes despite the absence of an air pocket. No significant changes occurred in any physiologic parameters in this group compared to baseline values. In contrast, the controls remained buried for a mean of 10 minutes ( $p = 0.003$ ) and became significantly hypercapnic ( $p < 0.01$ ) and hypoxic ( $p < 0.02$ ).

*Conclusions:* There is sufficient oxygen contained within a densified snowpack comparable to avalanche debris to sustain normal oxygenation and ventilation for at least 90 minutes during snow burial if exhaled CO<sub>2</sub> is

---

Anm. d. Herausgeber: Die vorliegende Arbeit wurde aus dem Englischen übersetzt.

removed. The prolonged oxygenation observed during CO<sub>2</sub> exclusion is irrespective of the presence of an air pocket.

*Keywords:* snow burial, asphyxia, displacement asphyxia, carbon dioxide.

## ZUSAMMENFASSUNG

*Ziel:* Zu bestätigen, dass die Ansammlung von ausgeatmetem CO<sub>2</sub> die Hauptursache für eine nicht mechanische Asphyxie bei einer Lawinenschüttung ist, indem anhand einer experimentellen Schneeeingrabung nachgewiesen wird, dass sich Oxygenierung und Ventilation durch eine vollständige Ableitung des ausgeatmeten CO<sub>2</sub> und Atmen der im Lawinenschnee verfügbaren Luft aufrechterhalten lassen.

*Methodik:* In der Versuchsgruppe wurden acht gesunde Freiwillige (mittleres Alter 32 Jahre, Bereich 19–44 Jahre) bis zu 90 Minuten lang in gepresstem Schnee mit einer Dichte zwischen 300–680 kg/m<sup>3</sup> in einer Seehöhe von 2.385 m vollständig eingegraben. Die sechs Männer und zwei Frauen atmeten direkt aus dem Schnee und verwendeten dabei ein Gerät, das im Bereich des Einatemschlauchs keine Atemhöhle aufwies und dessen verlängerter Ausatemschlauch vollständig aus dem Schnee ragte, um das gesamte ausgeatmete CO<sub>2</sub> abzuleiten. Die kontinuierliche physiologische Überwachung umfasste folgende Parameter: prozentuale Sauerstoffsättigung des Hämoglobins (SpO<sub>2</sub> in %), endtidaler CO<sub>2</sub>-Partialdruck (ETCO<sub>2</sub> in mm Hg), inspiratorischer CO<sub>2</sub>-Partialdruck (PICO<sub>2</sub> in mm Hg), EKG, Körperkerntemperatur rektal und Atemfrequenz. Zu Kontrollzwecken wurden fünf Personen untersucht, die unter ansonsten identischen Bedingungen ohne CO<sub>2</sub>-Ableitung direkt in eine faustgroße Atemhöhle atmeten.

*Ergebnisse:* In der Versuchsgruppe betrug die mittlere Eingrabungsdauer trotz Fehlens einer Atemhöhle 88 Minuten. Keiner der physiologischen Parameter veränderte sich signifikant, verglichen mit den Ausgangswerten. Im Gegensatz dazu waren die Kontrollpersonen im Mittel 10 Minuten (P = 0,003) eingegraben und wurden signifikant hyperkapnisch (P < 0,01) und hypoxisch (P < 0,02).

*Schlussfolgerungen:* In gepresstem, mit Lawinenschnee vergleichbarem Schnee ist genügend Sauerstoff vorhanden, um bei einer Verschüttung mindestens 90 Minuten lang eine normale Oxygenierung und Ventilation aufrechtzuerhalten, wenn das ausgeatmete CO<sub>2</sub> abgeleitet wird. Die verlängerte Oxygenierung bei einer CO<sub>2</sub>-Ableitung ist unabhängig von der Existenz einer Atemhöhle.

*Schlüsselwörter:* Schneeeingrabung, Asphyxie, Verdrängungsasphyxie, Kohlendioxid.

## **EINLEITUNG**

Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), das im Zuge der Zellatmung entsteht und als Inertgas ausgeatmet wird, gilt seit langem als Erstickungsgas, wenn es sich in schlecht belüfteten Bereichen, wie beispielsweise Minen oder Silos, rasch ansammelt (1). Die Rolle des  $\text{CO}_2$  beim Erstickungstod nach einer Lawinenverschüttung ist bisher kaum beachtet worden und bis zu einer vor kurzem von unserer Forschungsgruppe veröffentlichten Arbeit, die dem  $\text{CO}_2$  ein entscheidendes Gewicht bei der nicht mechanischen Asphyxie nach einer SchneeverSchüttung beimisst, nicht untersucht worden (2). Überdies haben uns Erfahrungen mit einer Weste mit künstlicher Atemhöhle (AvaLung™, Black Diamond Equip. Ltd., Salt Lake City, Utah), die das während der SchneeverSchüttung ausgeatmete  $\text{CO}_2$  von der Einatemluft weggleitet, gezeigt, dass das Vorhandensein einer Atemhöhle für die Aufrechterhaltung der Oxygenierung nicht so entscheidend ist wie eine  $\text{CO}_2$ -Ableitung. Wir stellten die Hypothese auf, dass in Schnee mit einer ähnlichen Dichte wie Lawinenschnee, unabhängig von der Existenz einer Atemhöhle, genügend Sauerstoff vorhanden ist, um die Oxygenierung und Ventilation aufrechtzuerhalten, wenn das  $\text{CO}_2$  vollständig aus dem unmittelbaren Verschüttungsbereich entfernt wird.

## **METHODIK**

Acht gesunde Freiwillige (sechs Männer und zwei Frauen) im Alter von 19 bis 44 Jahren (mittleres Alter 32 Jahre) wurden unmittelbar vor ihrer Eingrabung im Schnee zur Bestimmung der Ausgangswerte einer physiologischen Untersuchung unterzogen. Die Messungen erfolgten unter Einatmung von Umgebungsluft und umfassten folgende Parameter: prozentuale Sauerstoffsättigung des Hämoglobins ( $\text{SpO}_2$  in %), endtidaler  $\text{CO}_2$ -Partialdruck ( $\text{ETCO}_2$  in mm Hg), inspiratorischer  $\text{CO}_2$ -Partialdruck ( $\text{PICO}_2$  in mm Hg), Atemfrequenz, EKG und Körperkerntemperatur rektal. Die Testpersonen erhielten zum Frühstück klare Flüssigkeit und wurden mit mitteldicker synthetischer Unterwäsche, einem Goretex™-Overall mit Kapuze, einer Schneibrille, Gesichtsmaske, Haube, warmen Handschuhen und Skischuhen bekleidet. Das experimentelle Setup bestand aus einem großen Schneehügel, der festgestampft wurde und sich dann mit der Zeit so verfestigte, dass er in seiner Dichte Lawinenschnee entsprach. Die Dichte des Schnees wurde mit einem  $250\text{-cm}^3$ -Schneedichtemessgerät (Snowmetrics, Ft Collins, Colorado) gemessen und in  $\text{kg/m}^3$  angegeben. Es wurden durchschnittlich drei Messungen in verschiedenen Bereichen

der Innenwände und im Schnee, der zur Fertigstellung der Eingrabung verwendet wurde, vorgenommen. Die Dichte lag im Bereich von 300 bis 680 kg/m<sup>3</sup> (Mittelwert 370 kg/m<sup>3</sup>) und stimmte mit der Dichte von Lawenschnee überein, die gewöhnlich zwischen 300 kg/m<sup>3</sup> für eine mittelgroße Trockenschneelawine und 600 kg/m<sup>3</sup> für eine Nassschneelawine liegt. Ein schulterbreiter Graben wurde in den Hügel gegraben und eine Plattform errichtet, auf der die Testpersonen in sitzender Position mit Schnee zugeschüttet wurden.

Jede Testperson war mit einer modifizierten Version einer im Handel erhältlichen Weste mit künstlicher Atemhöhle (AvaLung<sup>TM</sup>) ausgestattet. Die AvaLung-Weste ermöglicht das Atmen der im Schnee enthaltenen Luft mittels eines Mundstücks, das mit einer geschlossenen 500 cm<sup>3</sup> großen Plastikatemhöhle verbunden ist. Die ausgeatmete Luft wird durch Einwegventile separiert und am Rücken der verschütteten Person von der Atemhöhle weg ausgelassen. Die Modifizierungen des von der Versuchsgruppe getesteten Geräts bestanden darin, dass die künstliche Atemhöhle entfernt wurde und die Öffnung des Einatemschlauches (4 cm<sup>2</sup> Oberfläche) in direktem Kontakt mit dem Schnee war. Zusätzlich zum Fehlen der künstlichen Atemhöhle wurde der Schlauch für die Ausatemluft verlängert, so dass er ganz aus den Schneemassen ragte und das gesamte ausgeatmete CO<sub>2</sub> abgeleitet wurde (Abb. 1). Die folgenden physiologischen Parameter wurden kontinuierlich beobachtet und in 1-Minuten-Abständen aufgezeichnet: SpO<sub>2</sub>, ETCO<sub>2</sub>, PICO<sub>2</sub>, Atemfrequenz, EKG und Körperkerntemperatur.

Die Eingrabungszeit null wurde registriert, sobald der Kopf zur Gänze mit gepresstem Schnee, der zur Vermeidung von Luftkanälen vorsichtig dicht anliegend platziert wurde, bedeckt war. Der Schnee wurde dann darübergehäuft und mit den Händen festgedrückt, bis eine Kopfüberdeckung von 30–100 cm erreicht war. Die geplante Studiendauer von 90 Minuten konnte auf Verlangen der Testperson vorzeitig beendet werden. Das Experiment wurde abgebrochen, sobald die SpO<sub>2</sub> unter 84 % oder die Körperkerntemperatur unter 35 °C fiel. Die Testpersonen standen mit dem Team an der Schneeoberfläche über eine Sprechanlage, die neben ihrem Gesicht vergraben war, in Verbindung. Die vor Ort getroffenen Sicherheitsvorkehrungen beinhalteten die Bereithaltung von hoch entwickelten Geräten zur Atemwegsbehandlung und von Medikamenten für eine Wiederbelebung. Am Mundstück des Geräts wurde aus Sicherheitsgründen ein Sauerstoffschlauch befestigt, der die eingegrabene Testperson bei Bedarf jederzeit mit 15 l/min 100%igem Sauerstoff versorgen hätte können.

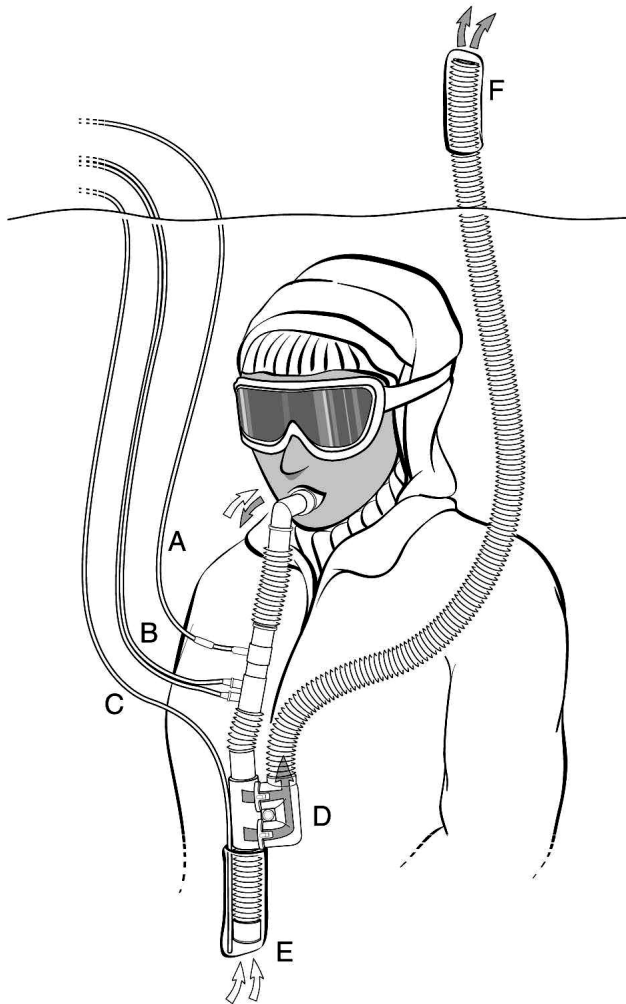


Abb. 1: Versuchsgerät zur Ableitung des ausgeatmeten Kohlendioxids aus dem Schnee bei direkter Schneeatmung. Die Versuchsperson atmet durch ein Mundstück ein und aus, während Kapnometer (A, B)  $PICO_2$ ,  $ETCO_2$  und die Atemfrequenz aufzeichnen. Die Luft wird über eine mit einem Drahtgeflecht geschützte Öffnung (E), an der eine Sauerstoffleitung für eine Notversorgung (C) angebracht wurde, eingeatmet. Eine Reihe von Einwegventilen (D) leitet die Ausatemluft getrennt mittels eines verlängerten Schlauchs (F) an die Schneeoberfläche. Die Testperson und das Gerät sind ohne Atemhöhle fest eingegraben.

Zu Kontrollzwecken wurden fünf der Testpersonen unter identischen Bedingungen und mit demselben Monitoring ein zweites Mal, aber ohne die CO<sub>2</sub>-Absaugvorrichtung eingegraben; sie atmeten dabei direkt in eine 500 cm<sup>3</sup> große Atemhöhle im Schnee (290 cm<sup>2</sup> Oberfläche). Die Kontrolleingrabungen wurden auf Verlangen der Testperson oder bei Absinken der SpO<sub>2</sub> unter 84 % bzw. der Körperkerntemperatur auf Werte unter 35 °C abgebrochen.

Das Experiment wurde in den Wasatch Bergen in Utah in einer Seehöhe von 2.385 m durchgeführt. Nach entsprechender Aufklärung wurde von jeder Testperson eine schriftliche Einverständniserklärung eingeholt und die Studie wurde vom LDA-Krankenhauskomitee für Forschung und Menschenrechte genehmigt.

Die Ausgangswerte der Testpersonen wurden mit den am Ende der Studie erhobenen Daten mithilfe des Mann-Whitney-U-Tests verglichen. Der Vergleich zwischen den Daten am Ende des Experiments mit CO<sub>2</sub>-Ableitung und den Daten am Ende der Kontrolleingrabungen erfolgte ebenfalls mit dem Mann-Whitney-U-Test. Statistica (StatSoft, Version 1999, Tulsa, Oklahoma) wurde für sämtliche statistischen Analysen eingesetzt. Ein P-Wert < 0,05 wurde für statistisch signifikant erachtet. Die Daten sind als Mittelwerte und Bereiche angegeben.

## **ERGEBNISSE**

Fünf der sechs Männer und beide Frauen konnten während der gesamten Testdauer von 90 Minuten (Mittel 88 Minuten, Bereich 73–90 Minuten) im Schnee eingegraben bleiben. Bei einer männlichen Testperson sank die Körperkerntemperatur unter den von uns festgelegten Grenzwert von 35 °C und er wurde nach 73 Minuten mit einer SpO<sub>2</sub> von 96 % aus den Schneemassen befreit. Keine der Testpersonen in dieser Gruppe entwickelte respiratorische Symptome und es gab keine signifikanten Veränderungen der physiologischen respiratorischen Parameter im Vergleich zu den Ausgangswerten (Tabelle 1).

In starkem Gegensatz dazu blieb die Kontrollgruppe mit einem Mittel von 10 Minuten und einem Bereich von 4–19 Minuten (P = 0,003) signifikant kürzer im Schnee eingegraben. Die Testpersonen wurden rasch hyperkapnisch und zeigten Symptome von Kopfweg, Panik, Atemnot und Unruhe, weswegen drei der fünf Personen den Abbruch des Experiments verlangten, bevor die physiologischen Grenzwerte erreicht worden waren. Ganz objektiv wurde in dieser Gruppe eine signifikante Verringerung der Sauerstoffsättigung beobachtet. Im Vergleich dazu kam es

A. Versuchsgruppe (mit CO <sub>2</sub> -Ableitung)										
Person	SpO <sub>2</sub> %		ETCO <sub>2</sub> mm Hg		PICO <sub>2</sub> mm Hg		AF Atemzüge/Min.		Eingabungs- dauer Minuten	
	Ausgangs- wert	Endwert	Ausgangs- wert	Endwert	Ausgangs- wert	Endwert	Ausgangs- wert	Endwert	Ausgangs- wert	Endwert
1	95	93	40	45			9	7	90	
2	98	99	39	35	3	4	14	12	90	
3	92	96	41	37			9	9	73	
4	94	97	37	36	0	4	9	5	90	
5	96	95	43	38	9	10	12	8	90	
6	96	96	42	28	6	9	10	8	90	
7	95	96	43	41	4	5	7	12	90	
8	92	96	32	30	4	5	19	19	90	
B. Kontrollgruppe										
Person #	SpO <sub>2</sub> %		ETCO <sub>2</sub> mm Hg		PICO <sub>2</sub> mm Hg		AF Atemzüge/Min.		Eingabungs- dauer Minuten	
	Ausgangs- wert	Endwert	Ausgangs- wert	Endwert	Ausgangs- wert	Endwert	Ausgangs- wert	Endwert	Ausgangs- wert	Endwert
1	95	83	34	53	2	44	22	33	11	
2	97	84	33	53	2	43	13	61	10	
4	94	76	37	57	0	38	9	13	4	
5	96	79	43	70	9	56	14	32	5	
8	92	93	32	61	4	41	20	39	19	

Tab.1: Ausgangswerte vs. Endwerte für die Versuchs- und die Kontrollgruppe\*

\*SpO<sub>2</sub> – pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung; ETCO<sub>2</sub> – endtidales Kohlendioxid, PICO<sub>2</sub> – inspiratorischer Kohlendioxidpartialdruck.

Mean Values and Ranges for SpO<sub>2</sub> vs. Burial Time

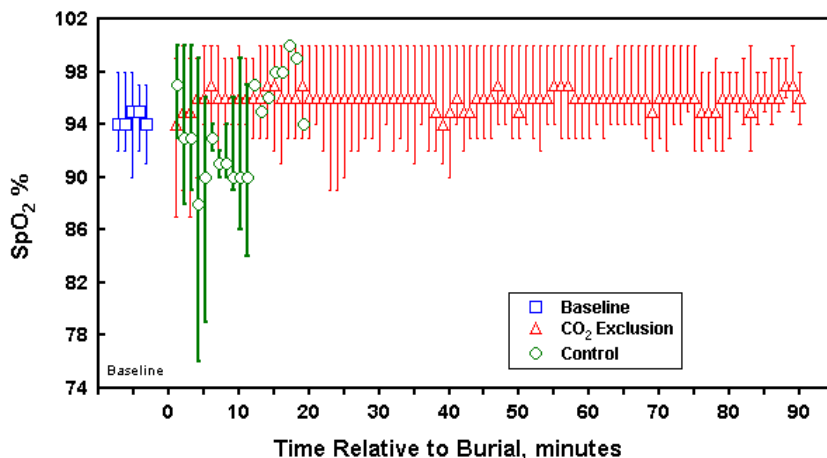


Abb. 2: Mittelwerte und Bereiche für SpO<sub>2</sub> vs. Eingrabungsdauer  
 Mittelwerte und Bereiche für die Sauerstoffsättigung (SpO<sub>2</sub>) unmittelbar vor Beginn der Versuche bei Atmung von Umgebungsluft (Baseline), während der Eingrabung mit CO<sub>2</sub>-Ableitung und während der Kontrolleingrabung. Manche Bereichsangaben gegen Ende der Kontrolleingrabungen fehlen aufgrund eines vorzeitigen Abbruchs (Eingrabungsdauer 4–19 Minuten, Mittel 10 Minuten).

Personen	Eingrabungsdauer (Min.) Mittelwert & (Bereich)	Mittlerer Ausgangswert SpO <sub>2</sub> %	Mittlerer Endwert SpO <sub>2</sub> %	Mittlerer Ausgangswert PICO <sub>2</sub> mm Hg	Mittlerer Endwert PICO <sub>2</sub> mm Hg	Mittlerer Ausgangswert ETCO <sub>2</sub> mm Hg	Mittlerer Endwert ETCO <sub>2</sub> mm Hg
Versuchsgruppe N = 8	88	95	96+	4	6**	10	36 ++
	(73–93)	(P = 0,17)		P = 0,23		P = 0,14	
Kontrollgruppe N = 5	10*	95	83+	3	44**	36	59++
	(4–19)	(P < 0,02)		P < 0,01		P < 0,01	

Tab. 2: Mittlere Ausgangs- und Endwerte in der Versuchsgruppe (mit CO<sub>2</sub>-Ableitung) und in der Kontrollgruppe

Die Ausgangsmittelwerte im Vergleich zu den Endmittelwerten in der Versuchsgruppe und der Kontrollgruppe für die Sauerstoffsättigung (SpO<sub>2</sub>), den inspiratorischen CO<sub>2</sub>-Partialdruck (PICO<sub>2</sub>) und das endtidale CO<sub>2</sub> (ETCO<sub>2</sub>). Die Endmittelwerte wurden auch zwischen den zwei Gruppen verglichen und statistisch erfasst. Für statistische Vergleiche wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet.



bei den normokapnischen Eingrabungen mit CO<sub>2</sub>-Ableitung zu einer verlängerten Aufrechterhaltung der Oxygenierung (P = 0,004) (Abb. 2). Ein statistischer Vergleich der Ausgangs- und Endwerte beider Gruppen ist in Tabelle 2 dargestellt. In der Versuchsgruppe mit CO<sub>2</sub>-Ableitung wurden zwischen Ausgangs- und Endwerten keine statistisch signifikanten Veränderungen der Mittelwerte für SpO<sub>2</sub>, PIO<sub>2</sub> oder ETCO<sub>2</sub> festgestellt, während in der Kontrollgruppe (Hyperkapnie) ein signifikanter Rückgang der mittleren Sauerstoffsättigung (P < 0,02) und ein Anstieg der mittleren CO<sub>2</sub>-Indizes (P < 0,01) beobachtet wurden.

Die Körperkerntemperatur sank im Mittel um 0,7 °C pro Stunde (Bereich 0,3–1,7 °C); dieser Wert wurde durch Extrapolation der 90-minütigen Eingrabungsdauer ermittelt. Bei den meisten Testpersonen trat gegen Ende der Eingrabung leichtes bis mäßiges subjektives Kältezittern auf. Nur eine Testperson klagte über heftiges, anhaltendes Zittern.

## KOMMENTARE

Die Überlebensdaten aus den Vereinigten Staaten und Europa zeigen, dass Asphyxie rasch nach einer Verschüttung auftritt und die Todesursache in bis zu 80 % aller Lawineneingänge mit tödlichem Ausgang ist (4, 5, 6). Es gibt jedoch auch dramatische Berichte von Überlebenden, die nach langer Verschüttungsdauer geborgen werden konnten und deren Überleben durchwegs mit dem Vorhandensein einer großen Atemhöhle oder eines Luftkanals in Zusammenhang gebracht wird. Obwohl Lawinenschnee äußerst kompakt und sehr dicht ist, enthält er immer noch 40 bis 60 % Luft, die nach einer Verschüttung geatmet werden kann. Die lebensrettende Atemhöhle dient als Gasaustauschkammer, zu der auch die Luft-Schnee-Grenzfläche, wo Sauerstoff und Kohlendioxid durch die poröse Oberfläche diffundieren, dazugehört. Wenn die physikalischen Eigenschaften des Schnees die Diffusion behindern, sammelt sich das CO<sub>2</sub> und wirkt in einem geschlossenen Raum als hypoxieauslösendes Erstickungsgas. Wenn sich zusätzlich an der Grenzfläche infolge des Gefrierens der in der Ausatemluft enthaltenen Feuchtigkeit eine Eislinse bildet, kommt die Diffusion zum Stillstand und die Asphyxie schreitet rasch voran.

In einer Vorstudie (7) wurde untersucht, wie sich eine Einschränkung des Gasaustausches zwischen dem Luftraum und dem Schnee auswirkt. Kugeln aus Drahtgeflecht dienten als „offene“ Lufträume, wohingegen Plastikkugeln effektiv „geschlossene“ Räume ohne Außenverbindung darstellten; Größe und Volumen der beiden Kugeltypen waren bekannt.

In sowohl dem offenen als auch dem geschlossenen System verlängerte sich der Zeitraum bis zum Eintreten einer kritischen Sauerstoffentsättigung mit zunehmender Größe des Luftraums. Dieses Ergebnis erhärtet frühere empirische Annahmen. Noch wichtiger aber ist, dass die offenen Lufträume bei jeder Größe und jedem Volumen eine wesentlich längere Oxygenierung erlaubten als die geschlossenen Räume, was bedeutet, dass eine gasförmige Verbindung mit dem Schnee ein unerlässlicher Faktor für eine ausreichende Respiration während einer Verschüttung ist.

Eine derartige Verbindung ermöglicht die Diffusion von Sauerstoff in den Luftraum und von Kohlendioxid in den Schnee, bis die jeweiligen Konzentrationsgradienten erreicht sind, die wahrscheinlich von Variablen wie Porosität, Temperatur, Wassergehalt und strukturellen Eigenschaften des Schnees beeinflusst werden. Außerdem steigert möglicherweise die während der Verschüttung entstehende örtlich begrenzte Wärme, die die Diffusion und die Dampfgradienten erhöhen könnte, die Gasbewegung. Überschreitet die Produktion die Diffusion, wird der Schnee schließlich mit  $\text{CO}_2$  gesättigt und die schädlichen Auswirkungen der Hyperkapnie machen sich bemerkbar. Jede Einschränkung der  $\text{CO}_2$ -Diffusion aus dem Luftraum hinaus, verursacht z. B. durch die Bildung von Eislinsen oder durch Schnee mit geringer Porosität (8), beschleunigt diesen Prozess. Ebenso verzögert jeder diffusionsbegünstigende Faktor, wie z. B. die größere Oberfläche einer großen Atemhöhle, das Entstehen einer Hyperkapnie.

Eine sehr rasch zum Tode führende Situation entsteht, wenn sich in einem geschlossenen Raum eine hohe Konzentration eines Inertgases befindet, da dieses den Sauerstoff aus der Einatemluft verdrängen kann. Der Begriff „Verdrängungsasphyxie“ trägt diesem Mechanismus (9) Rechnung, der durch das Hinzukommen eines Erstickungsgases wie Methan, Stickstoff oder  $\text{CO}_2$  die fortschreitende Abnahme des Sauerstoffpartialdrucks bewirkt. Klinische Krankheitsbilder, bei denen  $\text{CO}_2$  im Spiel ist, ergeben sich häufig in Zusammenhang mit schlecht belüfteten Brauereibottichen oder Silos, bei der Verbrennung von Grubengas in Kohlebergwerken und bei vulkanischen Emissionswolken großen Ausmaßes (1). Ein vor kurzem veröffentlichter Bericht machte diesen Verdrängungsmechanismus für den Tod eines Langläufers verantwortlich, der in ein Schneeloch gefallen war, das durch örtlich hohe  $\text{CO}_2$ -Werte aufgrund aufsteigender vulkanischer Emissionen kontaminiert war (10).

Nach einer Lawinenverschüttung sammelt sich das ausgeatmete  $\text{CO}_2$  im Schnee und in der Folge führt die Verdrängung des Sauerstoffs zu einer zunehmend hypoxischen Umgebung. Daten aus einer früheren Untersu-

chung (2) weisen darauf hin, dass dieser Umstand hauptsächlich auf das  $\text{CO}_2$  zurückzuführen ist und dass gemäß der alveolären Gasgleichung die arterielle Hypoxämie ein kritisches Ausmaß erreicht, bevor die Hyperkapnie schlimm genug ist, um eine  $\text{CO}_2$ -Narkose ( $\text{PaCO}_2 \geq 70$  mm Hg) zu verursachen (11). Es ist anzunehmen, dass dieser Prozess in großen Höhen schneller vor sich geht.

In der vorliegenden Studie haben wir die Rolle des Kohlendioxids im Erstickungsprozess wirkungsvoll isoliert, indem es als Variable vollständig aus unserem experimentellen Schneeeingrabungsmo-  
dell ausgeschlossen wurde. Die anhaltende Aufrechterhaltung der Oxygenierung, die – anders als beim vergleichsweise raschen Auftreten einer Hypoxie bei den hyperkapnischen Kontrollpersonen – während der Eingrabung mit  $\text{CO}_2$ -Ableitung durchwegs beobachtet wurde, bestätigt, dass im dichten, gepressten Schnee, ähnlich dem Lawinenschnee, genügend Sauerstoff vorhanden ist, um bei einer Verschüttung eine ausreichende Respiration über einen längeren Zeitraum hinweg aufrechtzuerhalten.

Interessanterweise wurden die Testpersonen bei den Kontrollversuchen trotz einer kleinen Atemhöhle schnell hyperkapnisch und hypoxisch, wohingegen sie bei den normokapnischen Versuchen ohne Atemhöhle normoxisch blieben. Es scheint also, dass der lebensrettende Luftraum die Sauerstoffextraktion aus dem Schnee nicht erhöht, sondern eher die  $\text{CO}_2$ -Entfernung aus der unmittelbaren Atemumgebung fördert. Möglicherweise ist eine vergrößerte Oberfläche mit einer erhöhten Diffusion für den Mechanismus verantwortlich, der in einem ausreichend dimensionierten Luftraum zur Wirkung kommt; diese Frage muss jedoch in weiteren Untersuchungen erst geklärt werden.

Die Kontrolleingrabungen simulierten eine tatsächliche Lawinenverschüttung, sodass die Testpersonen die entsprechenden physiologischen Reaktionen zeigten. Natürlich stammen diese Daten aus einem kontrollierten Experiment, das Asphyxie aufgrund einer mechanischen Thoraxkompression, einer Atemwegsobstruktion oder einer ungünstigen Position ausschloss. In Anbetracht der offensichtlichen Einschränkungen, die auf Sicherheitsüberlegungen zurückzuführen sind, nahmen wir eine Extrapolation unserer Ergebnisse vor, die uns dann als bestmögliche Annäherung für unsere Schlussfolgerungen diene.

Wie wichtig die Verlangsamung des Hyperkapnievorgangs ist, wurde bereits während der physiologischen Tests mit der Weste mit künstlicher Atemhöhle gezeigt, die das  $\text{CO}_2$  aus dem Inhalationsbereich wegleitet und dadurch die Entstehung einer Hyperkapnie und Hypoxie um bis zu eine Stunde verzögert. Die vorliegenden Daten legen nahe, dass eine voll-

ständige Ableitung des CO<sub>2</sub> aus dem unmittelbaren Verschüttungsbe-  
reich, wie sie auch durch ein Scheuermittel im Ausatemsystem der Weste  
mit künstlicher Atemhöhle erreicht werden kann, eine ausreichende Oxy-  
genierung deutlich verlängern würde.

Wir schließen daraus, dass in einer dichten, gepressten Schneemasse, ähn-  
lich dem Lawinschnee, genügend Sauerstoff vorhanden ist, um die Oxy-  
genierung und Ventilation für mindestens 90 Minuten während einer Ver-  
schüttung aufrechtzuerhalten, wenn das ausgeatmete CO<sub>2</sub> abgeleitet wird.  
Da bemerkenswerterweise bei einer CO<sub>2</sub>-Ableitung keine Atemhöhle für  
eine prolongierte Oxygenierung erforderlich war, liegt die Bedeutung der  
Atemhöhle bei der Verlängerung der Überlebensdauer nach einer Lawin-  
verschüttung wahrscheinlich darin, dass sie mehr Platz für größere  
Mengen ausgeatmeten Kohlendioxids bietet, oder aber, dass mehr CO<sub>2</sub> in  
den Schnee diffundieren kann.

## LITERATUR

- (1) Hamilton A., Hardy H. L.: *Industrial Toxicology*. 3rd Ed. Acton, Mass: Publishing Sciences Group, 235-237, 263-269 (1974).
- (2) Grissom C. K., Radwin M. I., Harmston C. H., Hirshberg E., Crowley T. J.: *Respiration During Snow Burial Using an Artificial Air Pocket*. JAMA. 283, 2266-2271 (2000).
- (3) McClung D., Schaerer P.: *The Avalanche Handbook*. 1st ed. Seattle, Wash: Mountaineers, 115 (1993).
- (4) Logan N., Atkins D.: *The Snowy Torrents. Avalanche Accidents in the United States 1980-1986*. Colorado Geological Survey, 240-243 (1996).
- (5) Falk M., Brugger H., Adler-Kastner L.: *Avalanche Survival Chances*. Nature 368, 21 (1994).
- (6) Grossman M. D., Saffle J. R., Thomas F., Tremper B.: *Avalanche Trauma*. J Trauma 29, 1705-1709 (1989).
- (7) Baum G. L., Wolinsky E.: *Textbook of Pulmonary Diseases*. Fifth Edition, Vol 1. Little, Brown and Co., 901-906 (1993).
- (8) Nunn J. F.: *Applied Respiratory Physiology*. 3rd Ed. London, Eng-land: Butterworths, 226, 475 (1987).