

Titel: Hubschraubertransport bei Patienten mit ARDS.

Autor: Schedler, O.¹; Hirsch, S.²; Handschak, H.²

Rettingsamt Senftenberg, Landkreis Oberspreewald-Lausitz

Zusammenfassung: Intensivtransporte mit Hubschraubern finden in der Indifferenzzone von 1000 ft bis 4000 ft (300 m bis 1220 m) statt. Während der Luftdruck (P_{BARO}) in Meereshöhe 760 mmHg beträgt, nimmt er mit zunehmender Flughöhe ab. Dabei verändert sich der Sauerstoffpartialdruck der Alveole (P_{AO_2}) am deutlichsten. Wir untersuchten die Veränderungen des P_{AO_2} und des P_{aO_2} an 10 Patienten mit ARDS während Hubschrauberintensivtransporten. Weiterhin wurden die Parameter CaO_2 , $Q_{\text{S}}/Q_{\text{T}}$ und der Oxygenierungsindex berechnet. In der Flughöhe von 2000 ft reduzierte sich, trotz kalkulierter Erhöhung des P_{AO_2} von 33 mmHg, der arterielle P_{aO_2} um 15 mmHg. Die Ursache dafür liegt in Perfusionsveränderungen schlecht ventilierter Lungenareale während der Transportphase, welche durch eine Zunahme des intrapulmonalen Shunt ($Q_{\text{S}}/Q_{\text{T}}$) gekennzeichnet sind. Hubschraubertransporte mit ARDS Patienten bleiben eine individuelle Entscheidung. Grundlagen liegen in der Bestimmung des P_{aO_2} und des Oxygenierungsindex.

Einleitung: Luftgebundene Intensivtransporte finden in der Indifferenzzone von 1000 ft bis 4000 ft (300 m bis 1220 m) statt. In dieser Höhe sind flugphysiologische Besonderheiten bei gesunden Personen nicht zu erwarten. Während der Luftdruck in Meereshöhe 760 mmHg (1013 mbar; 1 bar) beträgt, nimmt er mit zunehmender Höhe ab. Diese Veränderungen des Luftdruckes mit zunehmender Höhe werden in der barometrischen Höhenformel definiert ($p(h) = p_0 \times e^{-\frac{g_0 \times h}{p_0}}$ ^{h)}). Resultierende aus den Veränderungen des Luftdruckes sind nach dem Gesetz von Dalton ($P_{\text{Gesamt}} = P_1 + P_2 + P_n$) die einzelnen Partialdrücke. Die prozentuale Gaszusammensetzung bleibt bis zu einer Höhe von 100 km (Homosphäre) konstant. Das bedeutet, dass der Sauerstoffanteil der Atemluft immer 21 Prozent beträgt. Während der Wasserdampfdruck ($P_{\text{H}_2\text{O}}$) durch die Sättigung in der Atemluft konstant bleibt, der alveoläre Partialdruck von Kohlendioxid (P_{ACO_2}) sich erst in Höhen ab 15000 ft durch Hyperventilation verändert, reduziert sich der Sauerstoffpartialdruck (P_{AO_2}) mit zunehmender Höhe am deutlichsten. Die Abschätzung des alveolären Sauerstoffpartialdruckes kann nach folgender Gleichung rechnerisch bestimmt werden ($P_{\text{AO}_2} = P_{\text{baro}} - P_{\text{H}_2\text{O}} \times F_{\text{IO}_2} - P_{\text{aCO}_2} \times F_{\text{IO}_2} + 1 - F_{\text{IO}_2}/RQ$). Neben den Gasdruckveränderungen ist die Gasvolumenzunahme in der Luftrettung zu beachten. Gase sind im Gegensatz zu Flüssigkeiten kompressibel und verändern bei Luftdruckänderungen ihr Volumen. Diese physikalische Gesetzmäßigkeit findet sich in der Boyle-Mariotte Gleichung ($P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$) wieder. Das führt zu einer Volumenzunahme bei fallendem Luftdruck. Durch die Wasserdampfsättigung der Atemluft ist die Volumenausdehnung größer als im Vergleich zu trockenen Gasen. Auf Grund dieser Veränderungen kann es während Hubschraubertransporten in zunehmenden Höhen bei Patienten zu einer hypoxischen Hypoxie kommen. Gesunde, spontanatmenden Personen kompensieren die Höhenzunahme. Dazu gehören die Hyperventilation mit respiratorischer Alkalose (Höhenalkalose), die Steigerung des Herzzeitvolumen mit Erhöhung der Sauerstofftransportkapazität ($DO_2 = C_{\text{aO}_2} \times Q$) [3;10;11]. In Tabelle 1 werden die Veränderungen der Partialdrücke, des respiratorischen Quotienten und der Temperatur mit zunehmender Höhe anhand der Standardatmosphäre dargestellt.

Tabelle 1: ISO-Standardatmosphäre [6]

Höhe (m)	Höhe (ft)	Luftdruck (mbar)	Luftdruck (mmHg)	P _{AO₂} (mmHg)	P _{ACO₂} (mmHg)	P _{H₂O} (mmHg)	RQ	Temp. °C
0	0	1013,2	760	103	40	47	0,85	15
100	328	1001,2	751	101	39,9	47	0,85	14,4
200	658	981,4	742	100	39,6	47	0,85	13,7
305	1000	977,7	733	98	39,4	47	0,85	13
400	1312	966,1	725	96	39,3	47	0,85	12,4
500	1650	954,6	716	94	39,1	47	0,85	11,7
610	2000	942,2	707	94	39,0	47	0,86	10,1
914	3000	898,8	674	89	38,4	47	0,86	8,5
1219	4000	874,9	656	85	38,4	47	0,86	6,9
1524	5000	843,1	632	81	37,4	47	0,87	5,2

Material und Methoden: Während luftgebundener Transporte führten wir an 10 beatmeten Patienten mit ARDS Blutgasanalysen durch. Dazu nutzen wir das mobile iStat Blutgasanalysegerät mit Kartuschen (EG 6+/EG7+). Eine gerätespezifische Arbeitstemperatur (16°-28°C) wurde aufrechterhalten. Das Kartuschenfüllungsvolumen beträgt pro Messung 65 µl. Ein invasives Monitoring (arterielle Blutdruckmessung) zur arteriellen Probengewinnung war vor Flugbeginn vorhanden. Bei 5 der 10 Patienten ist ein vorhandener Pulmonalkatheter (PAK) zur Messung der pulmonalen Hämodynamik verwendet wurden.

Wir führten pro Patient drei arterielle Blutgasmessungen durch. Die erste Messung wurde vor Flugbeginn im Krankenhaus (Krankenhausmessung - KM) durchgeführt. Eine weitere Messung erfolgte nach Umlagerung des Patienten in den Hubschrauber (Ausgangsmessung - AM). Dabei wurden die Beatmungsparameter verändert. Den Änderungen der Beatmungsparameter ging ein druckkontrolliertes Rekrutmentmanöver der Alveolen vor Umlagerung in den Hubschrauber voraus. Dazu verwendeten wir kurzzeitig eine F_{O₂} von 100 Prozent und einen Beatmungsspitzendruck von maximal 40 mbar. Der PEEP wurde dann zwischen 12 und 13 mbar eingestellt. Gleichzeitig erfolgte die Bestimmung des Barometerdruck mittels iStat (Abbott) Gerätes in mmHg. Nach dem Start sollte eine Flughöhe von ca. 2000 ft (600 m) erreicht werden. In der erreichten Flughöhe erfolgte nach einer Flugzeit von 10 Minuten eine wiederholte Messung der Blutgase und des Barometerdruckes (Referenzmessung - RM). Weiterhin wurden alle verfügbaren Parameter der Ventilation des Servo 300 (Siemens) und der Hämodynamik (Propaq Encore) dokumentiert. Die mittlere Flugzeit betrug 27 Minuten. Das bedeutet bei einer maximalen Geschwindigkeit von 145 kn (Knoten) eine Transportstrecke von durchschnittlich 120 km.

Die dargestellten Werte und Parameter wurden retrospektiv zur Auswertung gebracht. Ein Ethikvotum wurde aus diesem Grund nicht erforderlich.

Ergebnisse: Die dargestellten Parameter sind Mittelwerte der erhobenen Messungen. Die Patienten wurden nach Umlagerung in den Hubschrauber druckkontrolliert (PCV) beatmet.

Tabelle 2: Beatmungsparameter zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten werden als Mittelwerte dargestellt

Messpunkt	P _{BARO} (mmHg)	Höhe (ft)	P _{Unterst.} (mbar)	AZV (ml)	PEEP (mbar)	F _I O ₂ (%)	PAW (mbar)	AF (1/min)
KM	760	0	21	480	15	60	30	15
AM	758	0	20	500	13	60	35	20
RM	700*	2000*	20	490	12	70	35	25*

* p < 0,05 P_{Unterst.} = Druckunterstützung; PAW = Max. pulmonaler Atemwegswiderstand

Mit Hilfe des iStat Gerätes ist es möglich Blutgasanalysen in der Luftrettung durchzuführen. Dazu muss ein Außentemperaturbereich von 16°C bis 28°C vorliegen. Alle Parameter liegen für 37°C Körpertemperatur vor.

Tabelle 3: Parameter der arteriellen Blutgasanalyse als Mittelwerte aller Messungen

Messpunkt	pH	P _a O ₂ (mmHg)	P _a CO ₂ (mmHg)	BE (mmol/l)	HCO ₃ (mmol/l)	S _a O ₂ (%)
KM	7,48	98	45	8,8	32,8	98
AM	7,44	102	42	6,8	30,0	98
RM	7,55*	83*	40*	7,2	30,8	97

* p < 0,05

Für die Berechnungen des P_aO₂ wurde die o.g. Formel verwendet. Der Oxygenierungsindex wird aus p_aO₂/F_IO₂ errechnet. Die Bestimmung der Sauerstoffverfügbarkeit erfolgte durch folgende Berechnung ($C_aO_2 = (Hb \times S_aO_2 \times 1,34) + P_aO_2 \times 0,0031$).

Tabelle 4: Errechnete Parameter (OI, P_aO₂, C_aO₂) und hämodynamische Parameter als Mittelwerte

	OI	p _a O ₂ (mmHg)	C _a O ₂ (mlO ₂ /100 ml)	Q _s /Q _T (%)	MAP (mmHg)	MPAP (mmHg)	HF (1/min)
KH Messung	163	400,8	14,7	15,3	75*	21	90
Ausgangsmessung	170	401,7	14,7	15,2	89	22	80
Referenzmessung	153*	433,5*	14,5	17,4*	85	25	85

* p < 0,05

Zur Stabilisierung des arteriellen Mitteldruckes (MAD) erfolgte bereits in 3 Fällen eine Katecholamintherapie mit Noradrenalin und Dobutamin.

Die Dosisrate wurde vor Flugbeginn gesteigert um einen mittlere arteriellen Druck (MAD) von mindestens 85 mmHg zu erreichen. Dazu war eine durchschnittliche Steigerung von Noradrenalin um 0,5 µg/kg/min und eine Anhebung der Infusionsrate für Dobutamin auf 5 µg/kg/min erforderlich.

Für die statistischen Analysen verwendeten wir für metrisch skalierte, unabhängige Proben ein t-Test.

Diskussion: Bei Intensivhubschraubertransporten in einer Höhe von 2000 ft (610 m) ist mit einem atmosphärischen Luftdruckabfall um 60 mmHg zu rechnen. Entsprechend dieser Höhe sinkt der alveoläre Sauerstoffpartialdruck bei Patienten um 10 mmHg [6]. Diese Abnahme betrifft spontan atmende Patienten sowie beatmete Probanden mit ARDS bei konstanter F_iO_2 gleichermaßen [9].

Während es innerhalb der erreichten Flughöhe zu einer Erhöhung des P_{AO_2} um 32,3 mmHg durch Erhöhung der F_iO_2 um 10 % kam, erfolgte ein Abfall des P_{aO_2} um 15 mmHg. Bei einem abgeschätzt, errechneten P_{AO_2} von 433 mmHg in 2000 ft Höhe liegt keine alveoläre Hypoxie vor. Trotz vorhandener Schädigung der alveolokapillären Diffusionsstrecke besteht bei einem P_{aO_2} um 80 mmHg in 2000 ft Flughöhe eine ausreichende Aufsättigung des Hämoglobins ohne arterielle Hypoxämie, so dass eine intrapulmonale Shunterhöhung (Q_s/Q_T) mit einer Abnahme des P_{aO_2} anzunehmen ist.

Die Strategie zur Erhöhung des P_{AO_2} liegt in erster Linie in der Steigerung der F_iO_2 . Die Reduzierung des P_{aCO_2} (Gesetz nach Dalton) wird durch Steigerung der Atemfrequenz am Respirator erreicht. Dadurch steigt, bei gleichem Atemzugvolumen (AZV) und gleichbleibender Druckunterstützung, das Atemminutenvolumen (AMV) an. Die auftretende respiratorische Alkalose erhöht die Sauerstoffaffinität des Hämoglobins mit der Reduzierung des P_{50} für O_2 . P_{50} ist der Partialdruck für O_2 bei der Hämoglobin zu 50 Prozent gesättigt ist. Die Reduzierung des Sauerstoffverbrauch (VO_2) kann durch Stressprophylaxe erreicht und die Erhöhung der Sauerstoffangebot (DO_2) durch Steigerung der Sauerstoffverfügbarkeit (C_aO_2) und der Herzzeitvolumens (Q) möglich werden. Der Transport schwerstkranker Patienten setzt eine suffiziente Analgosedierung zur Stressprophylaxe voraus. Im Fall der transportierten Patienten kommt es zu keiner Änderung der C_aO_2 . Durch die Steigerung des Herzzeitvolumen ($C_aO_2 \times Q$) wird das O_2 Angebot erhöht .

Bei einer höhenbedingten Abnahme des Luftdruckes um 60 mmHg (2000ft) nimmt durch $P_1 \times V_1 = \text{konstant}$ das Tidalvolumen um ca. 40 ml zu. Des weiteren muss mit einer höhenabhängigen, gerätespezifischen Zunahme des Tidalvolumen gerechnet werden [2]. Durch die programmierte Volumeninsufflation (IPPV) kann sich mit zunehmender Flughöhe durch Beatmung ein Barotrauma der Lunge entwickeln. Bei der inspiratorisch- und expiratorischen Druckniveaubeatmung (PCV) ist das insufflierte Volumen variabel. Der Beatmungsdruck bleibt gleich. Das Beatmungsregime des ARDS sollte auch in der Luftrettung in einer druckkontrollierten Beatmung mit Reduzierung des Atemzugvolumen (5-6 ml/kg) [4], der Limitierung des Atemwegdruckes sowie einer Einstellung eines optimalen PEEP (P_{aCO_2} - P_{etCO_2}) [1;11] bestehen. Alternative Beatmungsformen bei Patienten mit ARDS bestehen in der High Frequenz Ventilation (HFV) und der Inverse Ratio Ventilation (IRV). Additive Behandlungen wie extrakorporale Membranoxygenierung (ECMO), Stickstoffmonoxid (NO) oder Perfluorocarbon (PFC) Ventilation können je nach Platzbedarf für den luftgebundenen Intensivtransport übernommen werden.

Schlussfolgerungen: Hubschraubertransporte von Patienten mit ARDS sind Einzelentscheidungen. Grundlagen dafür bilden der arterielle Sauerstoffpartialdruck (P_{aO_2}) und die inspiratorische Sauerstoffkonzentration. Bei einer F_iO_2 von 100 Prozent bestehen nur geringe

suffiziente Kompensationsmöglichkeiten für die höhenbedingte Abnahme des P_{AO_2} . Ziele der Beatmung sind die Aufrechterhaltung der Oxygenierung und die Verhinderung eines Barotrauma der Lungen. Das Rekrutierungsmanöver der dorsobasalen Atelektasen [7] sollte vor der Flugphase vorgenommen werden. Die Abschätzung des alveolären Sauerstoffpartialdruckes hat in der Luftrettung nur einen geringen Stellenwert. Bis zu einer Flughöhe von ca. 1000 ft (300m) sind die physikalischen Veränderungen des Luftdruckes und des P_{AO_2} gering. Diese Flughöhe ist flugtechnisch möglich und medizinisch sinnvoll. Wesentlicher Vorteil luftgebundener Intensivtransporte bei Patienten mit ARDS ist die deutlich verkürzte Transportzeit. Die Bed Side Blutgasanalyse erlaubt Partialdruck-, Elektrolyt- und Blutzuckerbestimmungen und ermittelt den atmosphärischen Umgebungsdruck. Diese Form der Diagnostik- und Therapieorientierung sollte auf den Intensivhubschraubertransporten generell Anwendung finden.

Literatur:

- [1]Amato, MB et al (1998) Effect of a protective ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome. In: N Engl J Med; 338(6); 347-54
- [2]Brimacombe, T.G.(1994) Function of Draeger Oxylog ventilator at high altitude. In: Anaesth Intensive Care; Jun; 22(3);276-80
- [3]Chiang, ST.(1968) Anomogram for venous shunt (QS-QT) calculation; Thorax, Sep; 23(5):563-5
- [4]Domej, W.; Schwabegger, G.(2002) Die respiratorische Funktion Gesunder sowie chronisch Lungenkranker unter Einfluss der Höhe. In: Intensivmed 39;299-304
- [5]Eisner, MD et al (2001)Efficacy of low tidal volume ventilation in patients with different clinical risk factors for acute lung injury and acute respiratory distress syndrome. In: Am J Respir Crit Care Med;164(2);231-6
- [6]Frank, P.W.(1999) Flugphysiologie. ZaeFQ 93; 476-479
- [7]Hickling, KG et al (1990) Low mortality associated with low volume pressure limited ventilation with permissive hypercapnia in severe adult respiratory distress syndrome. In: Intensive Care Med; 16(6); 372-7
- [8]Lachmann, B. (1992) Open up the lung and keep the lung open. In: Intensive Care Med; 18(6); 319-21
- [9]Lawless, N.; Tobias, S.; Mayorga, A.(2001) F_iO_2 and positive end expiratory pressure as compensation for altitude induced hypoxemia in a acute respiratory distress syndrome model: Implications for air transportation of critically ill patients. In: Crit Care Med; Vol 29; No 11; 2149-55
- [10]Maggiorini, M et al (2002) Das Höhenlungenödem. In: Intensivmed 39;321-326
- [11]Schulze, E. (1990) Flugmedizin; 1. Auflage; Transpress Verlag Berlin;
- [12]Stewart, TE et al (1998) Evaluation of ventilation strategy to prevent barotrauma in patients at high risk for acute respiratory distress syndrome. Pressure and volume limited ventilation strategy group. In: N Engl J Med; 338(6); 355-61
- [13]Zietz, G.; Geske, R.(1991) Beatmung -Grundlagen und Praxis; Verlag Gesundheit