

Taucherausrüstung

Teil 4: Vereisung von Atemreglern

Bei modernen Atemreglern treten zum Glück die früher so gefürchteten Vereisungen nur noch selten auf. Leider gibt es dennoch immer wieder Tauchunfälle, die darauf zurückzuführen sind.

■ Text und Bilder von Bernd Nies

Warum vereisen Atemregler? Welche präventive Massnahmen gibt es? Was ist zu tun, wenn ein Atemregler abbläst? Es lohnt sich, dies einmal genauer anzuschauen – auch für Warmwassertaucher.

Ein Quäntchen Physik

Beim Gebrauch eines Tauchgeräts erfährt das Atemgas auf dem Weg von der Flasche in die Lunge des Tauchers Temperaturveränderungen an mehreren Stellen: Flasche, Flaschenventil, erste Stufe, zweite Stufe.

Bei Atmung oder Inflatorbetätigung sinkt in der Tauchflasche der Druck und das Gas expandiert. Das Gas erfährt dadurch

Beim Eistauchen erst unmittelbar vor dem Einstieg die Flasche aufdrehen und dann im Wasser probeatmen. Bei niedrigen Temperaturen reicht schon die feuchte Atemluft für eine Vereisung der zweiten Stufe.



eine Abkühlung, da dessen innere Energie abnimmt. Diese Zustandsänderung ist annähernd adiabatisch, d. h. die Zeitdauer ist zu kurz für einen Wärmeaustausch mit der Umgebung. In den Atempausen kann das Gas über die Flaschenwand Wärme aus der Umgebung aufnehmen. Strömt das Gas nun durch eine Drosselstelle (Ventil, erste oder zweite Stufe) entspannt es sich und erfährt eine weitere Temperaturveränderung. Dies wird als Joule-Thomson-Effekt bezeichnet. Unter Normalbedingungen gilt für die meisten Gase und Gasgemische (z. B. Stickstoff, Luft), dass die Temperatur bei Entspannung sinkt. Bei anderen Gasen (z. B. Helium) hingegen steigt sie. Die Ursache hierfür liegt in der Wechselwirkung der Gasteilchen. Bei grösserem Abstand der Teilchen zueinander ziehen sie sich gegenseitig an. Um bei Expansion den Abstand noch weiter vergrössern zu können, muss Arbeit geleistet werden. Die Teilchen werden dadurch langsamer, das Gas kühlt ab. Ist der Abstand der Gasteilchen zueinander sehr gering, so stossen sie sich gegenseitig ab und beschleunigen, wenn sie sich voneinander weg bewegen können. Das Gas erwärmt sich.

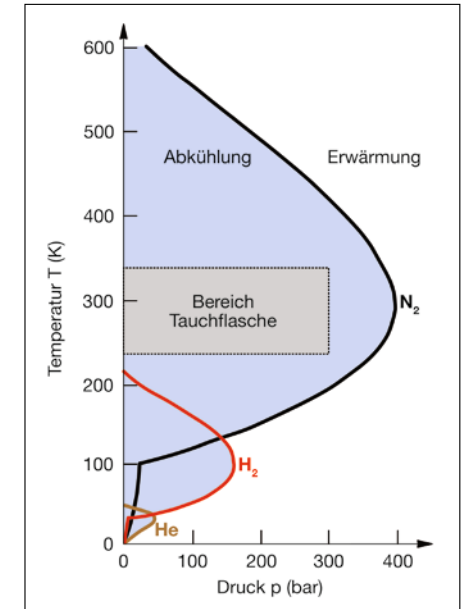
Der Joule-Thomson-Effekt ist in Richtung und Stärke abhängig von Temperatur und Druck. Dieser Übergang ist in Abb. 1 als Inversionskurve für verschiedene Gase wiedergegeben. Auf dieser Kurve ist der Joule-Thomson-Effekt gleich Null. Bei Stickstoff, bzw. Luft, hat diese Kurve ein Maximum bei ca. 170 bar, d. h. die Abkühlung durch den Joule-Thomson-Effekt ist dann am stärksten.

Vereisungsarten

Bei Atemreglern unterscheidet man zwei Vereisungsarten: innere und äussere Vereisung.

Bei der inneren Vereisung sind im Hochdruck und Mitteldruck befindliche bewegliche Bauteile (z. B. Ventilspindel und Ventil Sitz) des Atemreglers betroffen. Das für die Vereisung verantwortliche Wasser stammt aus dem Flascheninneren, dem Flaschenventil oder der ersten Stufe.

Bei der äusseren Vereisung gefrieren Teile des Atemreglers, welche der Umgebung ausgesetzt sind. Das Wasser dazu



Druck/Temperatur-Diagramm mit den Inversionskurven für den Joule-Thomson-Effekt verschiedener Gase. Innerhalb der Kurve kühlt sich das Gas bei Expansion ab, ausserhalb erwärmt es sich. Auf der Kurve findet keine Temperaturveränderung statt. Die rechteckige Fläche markiert den Druck- und Temperaturbereich, welcher beim Tauchen zu erwarten ist. Hier kühlt Luft/ Stickstoff immer ab bei Expansion, Helium aber erwärmt sich.

stammt aus der Umgebung oder der ausgeatmeten Luft. Sofern keine aussenliegenden beweglichen Teile betroffen sind, wie z.B. Kolben in der Wasserkammer einer kolbengesteuerten ersten Stufe oder der Kipphebel einer zweiten Stufe, ist die Funktion des Atemreglers nicht beeinträchtigt.

Beide Stufen eines Atemreglers können anfällig für Vereisung sein. Bei der ersten Stufe blockiert sie im offenen Zustand, und der Mitteldruck steigt unkontrolliert an. Dieser wird bei Downstream-Bauweise über die abblasende zweite Stufe oder bei Upstream über ein Überdruckventil an der ersten Stufe oder am Mitteldruckschlauch abgebaut. Vereist eine zweite Stufe, so bläst sie bei Downstream-Bauweise ab. Bei Upstream blockiert sie für gewöhnlich.

Einflussfaktoren

Die Wahrscheinlichkeit einer Vereisung eines Atemreglers wird von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Temperatur
- Tauchflasche
- Flaschendruck
- Atemregler
- Atemgas
- Feuchtigkeit
- Luftverbrauch
- Tauchtiefe

Temperatur

Die Temperatur der umgebenden Luft, des Wassers und des Tauchgerätes haben einen direkten Einfluss auf das Vereisungsrisiko. Der Tropentaucher kennt Vereisung höchstens von seinem Cocktailglas an der Bar. Als Kaltwasser bezeichnet man Wasser mit einer Temperatur von weniger als 10°C, wie sie hierzulande auch im heissesten Sommer in den Seen unterhalb der Sprungschicht anzutreffen ist. Im Winter ist bei Temperaturen unterhalb von 5°C auch an der Luft mit einem erhöhten Vereisungsrisiko zu rechnen. Generell sollte im Winter das Tauchequipment nicht lange draussen gelagert werden, da niedrige Temperaturen die mechanischen Eigenschaften von Dichtungen und Schmiermitteln negativ beeinflussen.

Tauchflasche

Form, Material, Wandstärke und Oberfläche einer Tauchflasche beeinflussen, wie schnell ein Wärmeaustausch zwischen dem umgebenden Medium und dem Atemgas im Innern stattfinden kann. Je besser die Wärmeleitfähigkeit des Flaschenmaterials, desto schneller kann sich das durch die Expansion abgekühlte Atemgas in den Atempausen wieder erwärmen.



Die Form von Tauchflaschen ist abgesehen vom Flaschenboden nahezu identisch. Wesentliche Unterschiede gibt es bei Material und Wandstärke. Aluminium leitet Wärme etwa fünfmal besser als Stahl. Da aber Aluf Flaschen eine rund fünfmal dickere Wandstärke als Stahlflaschen aufweisen, ist bei beiden das Temperaturverhalten in etwa vergleichbar. Bei Kompositflaschen hingegen wirkt die Umwicklung aus Kohlefaser, Glasfaser und Kunstharz derart isolierend, dass sich das Atemgas in den Atempausen nicht mehr erwärmen kann.

Messungen am Steigrohr im Inneren einer Stahlflasche haben unter Laborbedingungen (4°C Wassertemperatur, 50 m Tiefe, Abatmung mit 62.5 l/min nach DIN EN 250 Baumusterprüfung) ergeben, dass die Temperatur gegen Ende bei ca. -27°C ein Gleichgewicht erreicht. Derselbe Versuch mit einer Kompositflasche ähnlicher Grösse ergab einen viel schnelleren, konstanten Temperaturabfall, welcher den Messbereich des Sensors von -65°C unterschritt. (Berndt, 2016)

Theoretisch müsste auch eine Doppelflasche gegenüber einer Monoflasche mit ähnlichem Innenvolumen (z. B. 2 x 8.5 Liter gegenüber 15 Liter) etwas bessere Wärmeleiteigenschaften aufweisen, da die Oberfläche rund eineinhalb mal grösser ist. Wie gross der Unterschied tatsächlich ist und welchen Einfluss das Brückenventil hat, müsste einmal untersucht werden.

Dem Temperaturabfall des Atemgases kann mit zwei getrennten Flaschen entgegengewirkt werden. Wird in regelmässigen Intervallen (z. B. alle 20–50 bar) der Atemregler gewechselt, hat das Atemgas in der inaktiven Flasche genügend Zeit, sich der Umgebungstemperatur anzugleichen. Durch die

Links: Starke Vereisung an einer Apeks zweiten Stufe.

Bild: Mit freundlicher Genehmigung von John Clarke, johnclarkeonline.com.

Rechts: Äussere Vereisung auf erster Stufe und Flaschenventil nach einem Freeflow beim Sprung in den winterlichen Vierwaldstättersee.

Bild: Flex Keller, 2003

zusätzliche Redundanz kann im Problemfall höchstens die Hälfte des vorhandenen Luftvorrates verloren gehen.

Flaschendruck

Bei Luft ist der Joule-Thomson-Effekt bei einem Druck von 160–180 bar am grössten. Da die meisten Taucher 200-bar-Tauchgeräte verwenden, ist somit die Vereisungsgefahr genau dann am grössten, wenn die meiste Luft benötigt wird: zu Beginn des Tauchgangs bei Erreichen der grössten Tiefe, wenn zum Ausräumen der Inflator betätigt wird. Dass das nicht nur abstrakte physikalische Theorie, sondern traurige Wahrheit ist, haben Untersuchungen von Tauchunfällen mit Vereisung ergeben: Die meisten fanden genau in diesem kritischen Druckbereich statt.

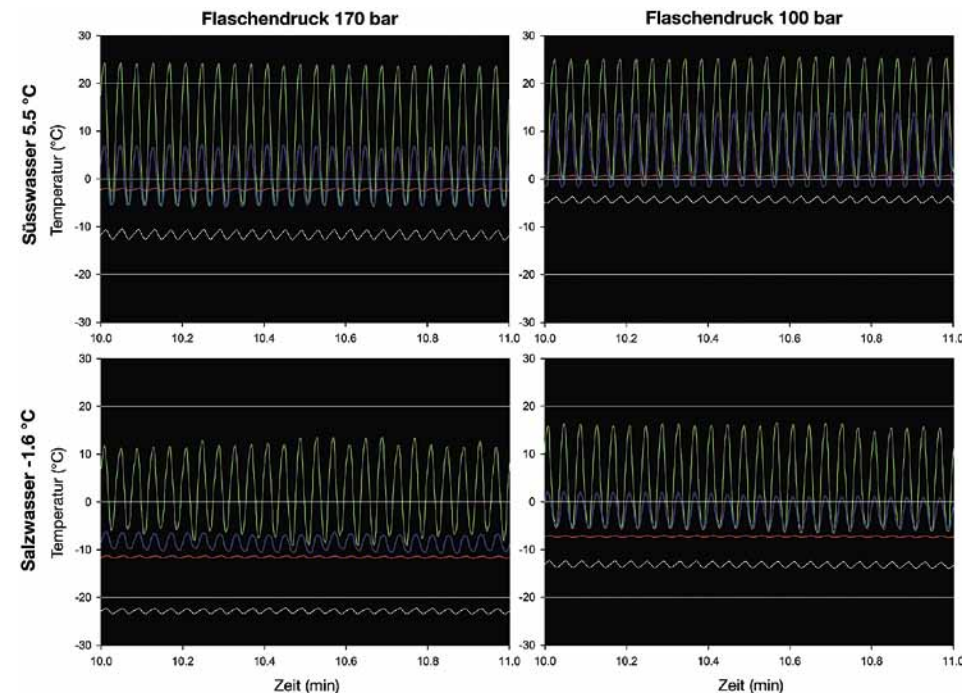
Atemregler

Messungen im Inneren verschiedener erster Stufen haben unter Laborbedingungen sehr unterschiedliche Werte ergeben und reichten von -27°C bis -13°C (Berndt, 2014) – anderen Quellen zufolge sogar -40°C (Mares Blog, 2017). Am geeignetsten für Kaltwasser sind membrangesteuerte, versiegelte erste Stufen, da hier keine beweglichen Teile mit Wasser in Berührung kommen. Als Werkstoff ist das übliche Messing zu bevorzugen. Erste Stufen aus Titan machen sich zwar im Fluggepäck besonders leicht, doch hat dieses Metall eine fünf- bis sechsfach schlechtere Wärmeleitfähigkeit und wegen der geringeren Dichte auch nur etwa die Hälfte der Wärmekapazität.

In der zweiten Stufe sind die Temperaturen gemessen am Kipphebel nicht ganz so niedrig und ebenso stark von der Bauform abhängig, aber oft noch deutlich im Minusbereich. Hier treten kalte Luft und Feuchtigkeit (Atem, Wasser) ständig aufeinander, weshalb die zweite Stufe wesentlich anfälliger für Vereisung ist.

Ein zwei Meter langer Schlauch für den Hauptatemregler ist nicht nur geeignet, um besser Luft spenden zu können, sondern er enthält unter Druck etwa so viel Luft, wie für einen Atemzug benötigt wird. Das gibt der Luft im Inneren des Schlauches in den Atempausen mehr Zeit für eine Erwärmung auf die Umgebungstemperatur, was das Vereisungsrisiko der zweiten Stufe reduziert.

Hauptatemregler und primäres Tariermittel sollen nicht an derselben ersten Stufe angeschlossen werden. Dies verteilt die gelieferte Luft auf zwei erste Stufen, welche dadurch weniger stark abkühlen. Einige Verbände empfehlen gar, an der



Temperaturkurven an vier Messpunkten eines Sherwood Maximus Atemreglers: Mitteldruckseite der ersten Stufe (weiss), Eingang zweite Stufe (rot), Ventilauslass zweite Stufe (blau), Mundstück (grün). Gemessen wurde in einer Druckkammer auf 60 Metern äquivalenter Wassertiefe, bei einer Abatmung von 62.5 l/min mit warmer, angefeuchteter Luft einer simulierten Lunge. Der Bereich zeigt eine Minute ab der 10. Minute Grundzeit, um die Wellenform des Temperaturverlaufs gut darzustellen. Mit freundlicher Genehmigung von John Clarke, johnclarkeonline.com und Navy Experimental Diving Unit (NEDU).



ersten Stufe des Hauptatemreglers keinerlei Inflatoren anzuschliessen, sodass trotz geschlossenem Hauptventil normal mit Weste und Trockenanzug tariert werden kann.

Atemgas

Da sich Helium innerhalb der im Tauchgerät herrschenden Temperaturen und Drücke aufgrund des Joule-Thomson-Effektes erwärmt, kann durch eine Beimischung von Helium ins Atemgas (Trimix) ein deutlich geringerer Temperaturabfall erzielt werden. Der Effekt ist im Flascheninneren zwar kaum

messbar, jedoch auf der Mitteldruckseite mit einigen Grad Celsius Unterschied am grössten. Bei extremen Bedingungen (z.B. Salzwasser unter 0°C) ist daher Trimix als erhöhtes Sicherheitspolster zu empfehlen.

Feuchtigkeit

Keine Vereisung ohne Feuchtigkeit. Ein paar Tropfen Wasser im Inneren einer Tauchflasche sind bereits über dem Grenzwert von regelmässig gewarteten Kompressoren. Wasser im Flascheninneren stammt aber meist aus dem Flaschenventil selbst und wird beim Füllen hineingedrückt. Daher das Ventil vor dem Füllen immer kurz ausblasen. Auch sollte stets ein Restdruck von ca. 30 bar in der Flasche bleiben, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Mikrofilter aus hydrophobem Kunststoff am Flaschenventil sorgen zusätzlich dafür, dass weniger Feuchtigkeit in die Flasche gelangen kann.

Beim Abspülen des Atemreglers darauf achten, dass keine Feuchtigkeit in den Atemregler gelangt: Erste Stufe luftdicht verschliessen und nicht die Luftdusche an der zweiten Stufe drücken. Wenn möglich alles unter Druck abspülen.

Schon die feuchte Ausatemluft kann bei sehr niedrigen Temperaturen die zweiten Stufe zum vereisen bringen. Liegt im Winter die Lufttemperatur unter der des Wassers, soll der Atemregler deshalb erst im Wasser probeatmet werden.

Luftverbrauch

Je mehr Luft ein Atemregler liefern muss, desto stärker kühlt er ab. Daher soll der Luftverbrauch, besonders im kritischen Druckfenster von 160–180 bar minimiert werden. Beim Abstieg den Inflator zur Befüllung der Tarierweste und/oder Trockenanzug nicht ganz am Schluss wie die Reissleine eines Fallschirms betätigen, sondern mehrmals in kurzen Intervallstössen. Eine zusätzliche Reduzierung kann mit einer dedizierten Flasche für den Trockenanzug erreicht werden.

Der eigene Luftverbrauch kann durch eine gute Tarierung mit der korrekten Menge Blei reduziert werden. Ein gut isolierender Trockenanzug ist nicht verkehrt, denn wer friert, atmet schneller und ist gestresst. Körperliche Anstrengung um sich aufzuwärmen, ist unter Wasser in puncto Luftverbrauch kontraproduktiv.

Wenn bei einer Ohne-Luft-Situation zwei Taucher aus derselben Flasche atmen, besteht erhöhtes Vereisungsrisiko. Durch den massiv erhöhten Luftbedarf (in der Situation sind beide Taucher zusätzlich gestresst) kühlt die Luft bereits in

der Flasche noch stärker ab und gelangt so noch kälter in die Atemregler. Ob diese dann getrennte erste Stufen besitzen, spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

Tauchtiefe

Das Verhältnis von Flaschendruck zu Mitteldruck (Umgebungsdruck plus etwa 10 bar) sinkt mit zunehmender Tauchtiefe, wodurch sich die Abkühlung durch den Joule-Thomson-Effekt eigentlich etwas verringern

müsste – wäre da nicht der mehrfach erhöhte Luftbedarf: Ein Atemzug auf 40 Metern Tiefe bei 5 bar Umgebungsdruck benötigt fünfmal mehr Luft wie an der Oberfläche. Die Abkühlung des Atemgases und somit das Vereisungsrisiko steigt mit zunehmender Tauchtiefe. Hier kommt ein weiterer Vorteil von Trimix zum Vorschein: Nicht nur die Stickstoffnarkose ist geringer, sondern auch Abkühlung des Atemgases, da sich Helium bei Expansion erwärmt.

Hilfe, der Atemregler bläst ab!

Bläst ein Atemregler ab, bleibt nicht viel Zeit das Problem zu lösen. Je nach Tauchtiefe und Flaschengrösse ist diese in nur ein bis zwei Minuten leer. Was ist zu tun?

1. Keine Panik! Aus einer abblasenden zweiten Stufe kann weiter geatmet werden.
2. Zweite Stufe aus dem Mund nehmen, Mundstück nach unten halten und versuchen, dieses mit dem Daumen oder der Hand zu verschliessen. Meist stoppt dies ein Freeflow.

Zeigt dies keinen Erfolg, gibt es je nach Ausrüstung verschiedene Vorgehen. Taucher mit Sidemount-Flaschen, Doppelgerät auf dem Rücken oder langer Monoflasche mit T-Ventil sollten in der Lage sein, das Problem eigenständig innert Sekunden wie folgt zu beheben:

1. Auf den Reserveautomaten wechseln
2. Dem Schlauch der abblasenden zweiten Stufe bis zum Ventil folgen und dieses schliessen.
3. Flaschendruck und Tauchtiefe überprüfen



Eisbildung in einer Mares Orbiter zweiten Stufe, nach ca. 150 bar forciertem Freeflow ohne Frontabdeckung in ca. 8°C kaltem Wasser. Der für Mares-Automaten charakteristische Bypass verhindert grössere Eisbildung am Kipphebel, wie es bei anderen Automaten vorkommen kann.

4. Dem Tauchpartner den Vorfall signalisieren, den Luftvorrat mitteilen und ob man aufsteigen oder den Tauchgang ganz abbrechen möchte.
5. Ein paar Minuten warten und das Ventil langsam wieder aufdrehen. Eine Vereisung müsste bis dann aufgetaut sein.
6. Bläst der Automat noch immer ab, Ventil wieder zudrehen und Tauchgang beenden.

Hat das Tauchgerät zwar zwei getrennte Stufen, aber man kommt nicht selber an die Ventile ran, weil die Flasche zu niedrig sitzt oder die Ventilräder nach unten statt zur Seite oder nach oben zeigen, ist wie folgt vorzugehen:

1. Sofort zum Tauchpartner schwimmen und das Problem signalisieren.
2. Auf den Reserveautomaten wechseln
3. Dem Tauchpartner zeigen, er solle dem Schlauch des abblasenden Automaten folgen und das Ventil zudrehen.
4. In 50% der Fälle wird der Tauchpartner trotzdem das falsche Ventil zudrehen. Ruhe bewahren, den Reserveautomaten des Tauchpartners nehmen und warten, bis das richtige Ventil geschlossen ist.
5. Flaschendruck und Tauchtiefe überprüfen
6. Den Luftvorrat mitteilen und ob man aufsteigen oder den Tauchgang ganz abbrechen möchte.
7. Ein paar Minuten warten und das Ventil langsam wieder aufdrehen lassen.
8. Bläst der Automat noch immer ab, Ventil wieder zudrehen und Tauchgang beenden.

Taucht man wider aller Vernunft mit einem Tauchgerät mit nur einer ersten Stufe und ausser Sicht- oder Reichweite seines Tauchpartners:

1. Mit dem abblasenden Automaten im Mund weiteratmend den Tauchgang sofort beenden.
2. Während des Aufstiegs ständig den Flaschendruck im Auge behalten.
3. Neigt sich der Flaschendruck gegen 50 bar und ist man von der Oberfläche noch weit entfernt, auf den Reserveautomaten wechseln und den Schlauch des abblasenden Atemreglers abknicken, um so den Durchfluss zu begrenzen. Klappert am besten mit Gummischlauch, geht aber auch meist mit Flexschlauch.
4. Nach Erreichen der Oberfläche die eigene Ausrüstung für das Gewässer und Qualifikation als Taucher kritisch in Frage stellen.

Übungen

Es ist äusserst empfehlenswert den Ventildrill regelmässig zu üben, bis er ohne nachzudenken automatisch abläuft – am besten am Anfang oder Schluss eines Tauchgangs. Das spart im Ernstfall wertvolle Zeit.

Es sollte keine ungewohnte Situation sein, aus einem abblasenden Automaten zu atmen. Dazu einfach die Luftdusche gedrückt halten, das Mundstück nicht ganz umschliessen und den Kopfseitwärts halten. Dies aber besser im warmen Wasser üben, da sonst der Automat wirklich einfrieren kann.

Wer eine kurze 12-Liter-Flasche besitzt und somit nicht selber ans Ventil gelangt, kann versuchen, nach vorne gebeugt die Flasche nach oben zu drücken. Manche ziehen auch dazu ihr Jacket aus. Empfehlenswert ist dieses Vorgehen aber nicht, da man in der Hektik schnell unkontrolliert die Tauchtiefe verlieren kann.

Spätestens am Ende dieses Artikels sollte jeder Taucher für sich überlegt haben, ob seine Ausrüstung für kalte Gewässer geeignet ist und ob er eine Fehlfunktion seines Atemgeräts sofort selber beheben kann oder auf die Fähigkeit seines Tauchpartners vertraut. ■

Quellen

- Wikipedia: «Joule-Thomson-Effekt», Wikipedia, 19. 9. 2017, <https://de.wikipedia.org/wiki/Joule-Thomson-Effekt>
- Mares-Team Blog: «Ankündigung Technik Serie Kaltwasser», 1. 12. 2017, <http://mares-team.de/ankundigung-technik-serie-vereisung/>
- John Clarke: «How cold can scuba regulators become», 8.1.2018, <http://johnclarkeonline.com/2014/05/25/how-cold-can-scuba-regulators-become/>
- John Clarke: «Safe Water Temperatures for Scuba Regulators», 8. 1. 2018, <http://johnclarkeonline.com/2015/10/14/eating-crow-safe-water-temperatures-for-scuba-regulators/>
- Frank Ostheimer: «Begründungen und Hintergrundwissen für VDST Spezialkurs Problemlösungen beim Tauchen, VDST Ausrüstungsempfehlung», 10. 1. 2018, http://www.wlt-ev.de/fileadmin/user_upload/Download/Begruendung-Ausruestungsempfehlungen_Handreichung.pdf
- Mares-Team Blog: «Serie Vereisung: Teil 1 Auslöser und begünstigende Faktoren», 1. 12. 2017, <http://mares-team.de/serie-vereisung-teil-1-ausloeser-und-begunstigende-faktoren/>
- Mares-Team Blog: «Serie Vereisung: Teil 2 Normen und Standards», 1. 12. 2017, <http://mares-team.de/serie-vereisung-teil-2-normen-und-standards/>
- Mares-Team Blog: «Serie Vereisung: Teil 3 Technische Aspekte», 1. 12. 2017, <http://mares-team.de/serie-vereisung-teil-3-technische-aspekte/>
- Dr. Dietmar Berndt: «Prüfen - Messen - Analysieren. Tauchausrüstung auf dem Prüfstand», Divemaster 79, 1/2014
- Dr. Dietmar Berndt: «Prüfen - Messen - Analysieren. Teil 2. Kältebelastung von Atemreglern», Divemaster 80, 2/2014
- Dr. Dietmar Berndt: «Vereisung von Atemreglern. Adiabatische Abkühlung bei Atemgasen. Erste Messungen», Divemaster 90, Okt 2016
- Dr. Dietmar Berndt: «Vereisung von Atemreglern. Adiabatische Abkühlung bei Atemgasen. Teil 2. Weitere Messungen u. a. Einbeziehung von Helium», Divemaster 93, Juli 2017