

# Gasübersättigung im Wasser; ein blinder Fleck der Hydrogeologie

Heinz Surbeck <sup>1</sup> und Frédéric Bossy <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nucfilm GmbH, Cordast, Schweiz, <sup>2</sup> HydroSol Sarl, Bulle, Schweiz

## Abstract

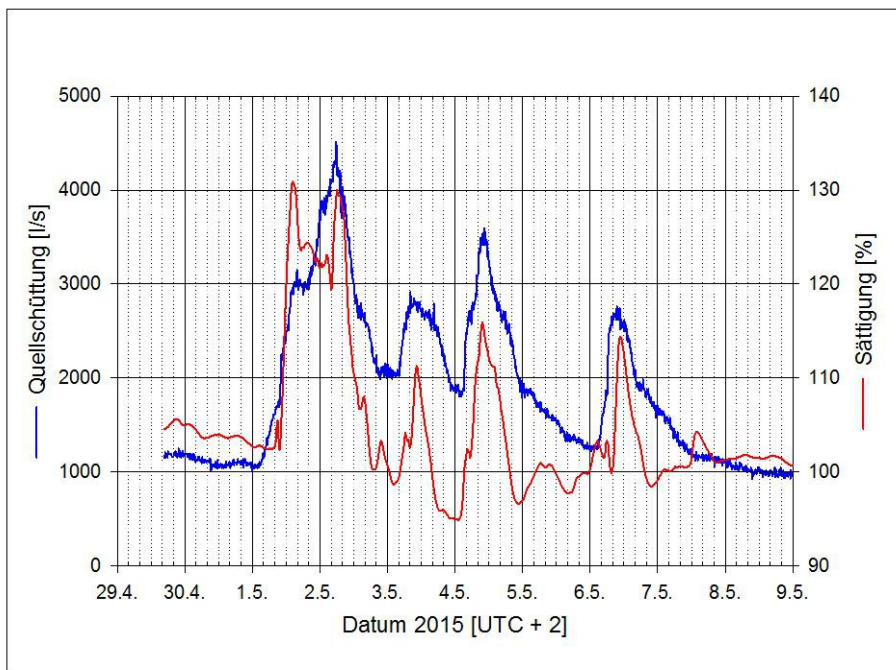
Dissolved gases in groundwater are only rarely in equilibrium with the atmosphere. Hydrostatic pressure on soil gas bubbles dissolving in percolating water, compression of air pockets in karst systems, air leaks in pumps or pipes, releases of water from dams or drilling with compressed air all lead to supersaturation. Supersaturation is stressing fish seriously even at 5 % above atmospheric pressure. 30 % above atmospheric pressure may be lethal. Particularly high supersaturation has been found in a karst spring in Neirivue, canton of Fribourg, Switzerland. This water is used for a fish farm. Details on the instrumentation and data are presented for this spring, including data on the efficiency of a degassing unit used to protect the fish from supersaturation. In addition we will try to motivate hydrogeologist to have a closer look at supersaturation. Apart from the problem fishes get it offers a wealth of still rarely used information.

## Einleitung

Im Grundwasser gelöste Gase sind selten im Gleichgewicht mit der Atmosphäre. Bei der Infiltration von Regenwasser lösen sich Gasblasen im Boden mit zunehmender Tiefe unter erhöhtem hydrostatischem Druck. Damit liegt die Summe der Partialdrücke der gelösten Gase (TDGP, Total Dissolved Gas Pressure) im Grundwasser über dem Atmosphärendruck. Die Kompression der Luft in Karsthöhlen bei Hochwasser, Gaslecks in Pumpen und Rohren, Schwallereignisse bei Staumauern (Wesley and Raymond 1976) oder der Einsatz von Druckluft bei Bohrungen im Grundwasser können ebenfalls zu einer erheblichen Gasübersättigung führen.

Die Bedeutung der Gasübersättigung ist den meisten Hydrogeologen nicht bewusst. Die Gasübersättigung liefert aber einerseits wertvolle Information zu Transportvorgängen im Grundwasser (Klump et al. 2008, Babic 2014) und kann andererseits eine erhebliche Gefahr für Fische sein. Blasenbildung im übersättigten gespannten Grundwasser kann die hydraulische Permeabilität massiv reduzieren und damit zu völlig falschen Resultaten bei Pumpversuchen führen (Manning et al. 2003).

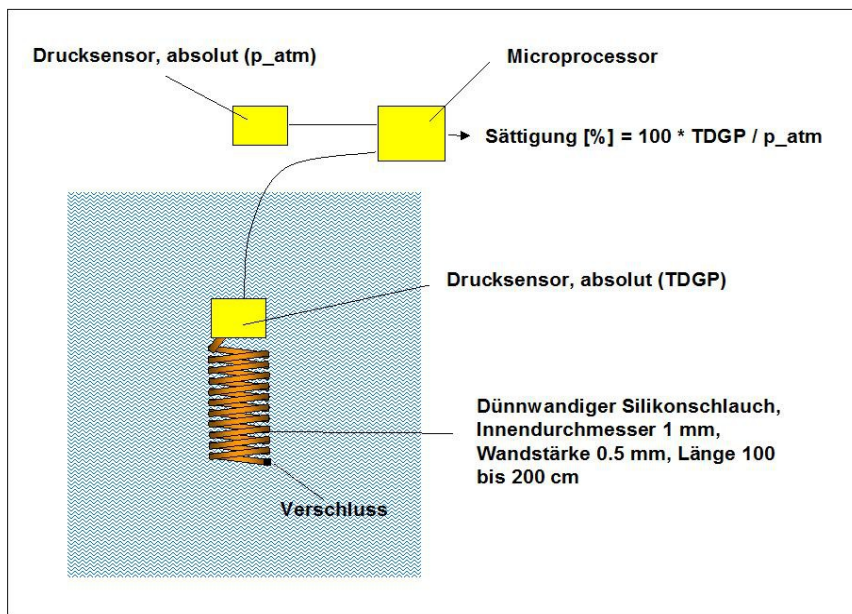
Eine extreme Gasübersättigung haben wir bei einer Karstquelle im Kanton Freiburg in der Schweiz gefunden (Fig.1). Das Wasser dieser Quelle speist eine Fischzucht (Regenbogenforellen). Bereits eine Gasübersättigung von 5 % über dem Atmosphärendruck (105 % in Figur 1) führt zu einem erheblichen Stress bei den Fischen, 30 % (130 % in Figur 1) zu einer lebensbedrohenden Blasenbildung (Blasenkrankheit).



**Fig. 1** : Schüttung und Gassättigung bei der Neirvue-Quelle nach Starkniederschlägen im Mai 2015.

## Messmethode

Die Summe der Partialdrücke der im Wasser gelösten Gase (TDGP, Total Dissolved Gas Pressure) ist sehr einfach zu messen (Fig. 2). Ein dünnwandiger Silikonschlauch (Innendurchmesser 1 mm, Wandstärke 0.5 mm, Länge 1 bis 2 m) wird am einen Ende verschlossen und am anderen Ende mit einem Drucksensor (Absolutdruck) verbunden. Ein zweiter Drucksensor (Absolutdruck) ausserhalb des Wassers liefert den Atmosphärendruck ( $p_{atm}$ ). TDGP/ $p_{atm}$  wird als Gassättigung bezeichnet, meistens in % ausgedrückt. Die Diffusion der Gase durch das Silikon braucht Zeit. Mit dem oben erwähnten Schlauch ergibt sich eine „Halbwertszeit“ für den Aufbau eines Gleichgewichts von 10 bis 15 Minuten, je nach Wassertemperatur (bei 25°C : 3.5 min für  $O_2$ , 8 min. für  $N_2$  ). Für kontinuierliche Messungen heisst das, dass die Zeitauflösung bei 20 bis 30 Minuten liegt, was selbst für Karstquellen genügt.



**Fig. 2** : Prinzip der Messung der Gassättigung

## **Anwendung bei einer Fischzucht**

Die von uns untersuchte Karstquelle versorgt eine Forellenzucht in Neirivue, in der Nähe von Gruyère im Kanton Freiburg (Schweiz) mit chemisch und bakteriologisch einwandfreiem Wasser. Nach Starkniederschlägen im Einzugsgebiet der Quelle können aber massive Gasübersättigungen zu einer akuten Gefährdung der Forellen führen. Schon eine Gassättigung von 105% stresst die Fische so stark, dass sie anfällig für Erkrankungen durch allgegenwärtige Bakterien und Pilze werden. Bei 130 % leidet ein grosser Teil der Fische unter der lebensbedrohenden Blasenkrankheit. In den untiefen Zuchtbecken sind die Fische besonders exponiert, da sie kaum abtauchen können, um die Blasenbildung durch den hydrostatischen Druck zu verhindern. Der Grund für die Uebersättigung des Quellwassers dürfte ein Einschluss von Hohlräumen im Karst durch überstehendes Wasser nach Starkniederschlägen sein. Durch den erhöhten Druck lösen sich mehr Gase im Wasser. Da vom Einzugsgebiet bis zur Quelle gespanntes Grundwasser vorherrscht, kann kaum ein Ausgleich mit der Atmosphäre stattfinden.

Bis Frühjahr 2015 sorgte eine einfache Vorrichtung zur turbulenten Belüftung des Quellwassers für einen Abbau der Uebersättigung. In den letzten 10 Jahren scheinen aber die Starkniederschläge häufiger und intensiver geworden zu sein.

Der Besitzer der Fischzucht hatte deshalb 2014 beschlossen, eine Anlage zu installieren, die die Uebersättigung wesentlich besser reduziert. Bei der im Mai 2015 in Betrieb genommenen Anlage (Fox France Oxygénation, Saint-Urbain, France) wird Sauerstoff unter Druck eingeblasen um einen Teil des Stickstoffs auszutreiben. Der Stickstoff ist das, was den Fischen Probleme macht, da er im Gewebe sehr viel langsamer als Sauerstoff diffundiert und nicht verarbeitet werden kann.

Unsere langjährigen kontinuierlichen Messungen der Gasübersättigung dieser Karstquelle zeigten, dass im Extremfall Gassättigungen von bis zu 130% abgefangen werden müssen. Das war die Grundlage für die Dimensionierung

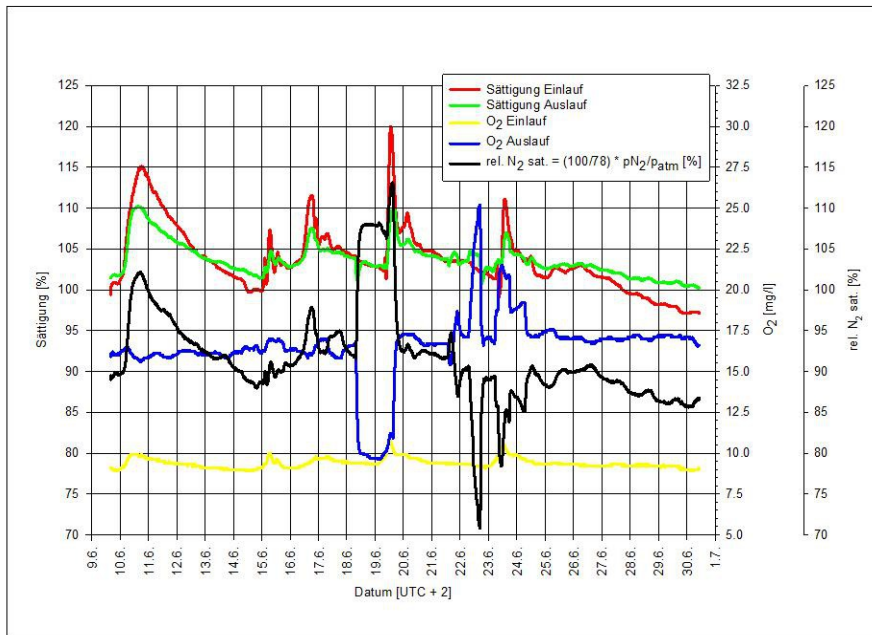
der neuen Anlage.

Nach der Installation der neuen Anlage haben wir vor und nach der Anlage jeweils nicht nur die Gassättigung, sondern auch den Sauerstoffgehalt kontinuierlich gemessen. Aus den Sauerstoffkonzentrationen vor und nach der Anlage, dem Durchfluss und der zugeführten Menge an Sauerstoff lässt sich die Ausbeute der Anlage berechnen. Es zeigte sich, dass etwa 80% des zugeführten Sauerstoffs im Wasser verbleibt. Diese hohe Ausbeute ist zwar wirtschaftlich bedeutend, aber für die Fische wichtiger ist, wie viel Stickstoff noch relativ zum Gehalt in der Atmosphäre verbleibt. Leider gibt es noch keine Sensoren für  $N_2$ , aber die übrigen gelösten Gase lassen sich entweder messen ( $O_2$ ,  $CO_2$ ), sind mengenmässig unbedeutend (Ar), oder lassen sich aus der Wassertemperatur berechnen ( $H_2O$ -gasförmig). Unsere Messungen haben gezeigt, dass der  $CO_2$ -Gehalt auch bei Hochwasser 0.6 Vol% nicht überschreitet und daher bei der Berechnung der  $N_2$ -Konzentration vernachlässigbar ist.

In der Atmosphäre beträgt der Volumenanteil des Stickstoffs etwa 78 %, derjenige des Sauerstoffs etwa 21 %, der Rest sind Ar,  $CO_2$  und Wasserdampf. Ziel des Ausgasens ist es, den Partialdruck des im Wasser gelösten  $N_2$  nicht über den Partialdruck des  $N_2$  in der Atmosphäre steigen zu lassen. Unsere  $O_2$ -Sensoren (Piccolo $O_2$ -OEM, PyroScience GmbH, Aachen, Deutschland) liefern den Partialdruck des im Wasser gelösten  $O_2$ . Der Atmosphärendruck wird ebenfalls kontinuierlich gemessen und es wird angenommen, dass der  $O_2$ -Anteil in der Atmosphäre konstant bei 21 % liegt. Mit diesen Daten und dem TDGP lässt sich das Verhältnis des  $N_2$  Partialdrucks im Wasser zum  $N_2$  Partialdruck in der Atmosphäre berechnen. Für einen für die Fische komfortablen Betrieb der Ausgasanlage sollte die  $O_2$  Zufuhr so geregelt werden, dass dieses Verhältnis  $< 1$  bleibt ( $< 100$  % in Fig. 3).

„Glücklicherweise“ hatten wir im Juni 2015 einige Starkniederschläge, die uns genügend Daten bei starker Uebersättigung geliefert haben. Da gleichzeitig die Sauerstoffzufuhr in mehreren diskreten Stufen geändert wurde, konnten wir

berechnen, wie viel Sauerstoff bei welcher Uebersättigung zugeführt werden muss, damit der  $N_2$  Partialdruck im Wasser nicht über den Partialdruck in der Atmosphäre steigt, das heisst, dass bezüglich des Stickstoffs keine Uebersättigung vorliegt (Fig. 3).



**Fig. 3** : Zeitreihen Juni 2015 für Sättigung und O<sub>2</sub> Konzentration im Einlauf und im Auslauf der neuen Ausgasanlage und die daraus berechnete N<sub>2</sub> Konzentration im Vergleich zur N<sub>2</sub> Konzentration in der Atmosphäre (rel. N<sub>2</sub> sat.). Die „Sauerstoff-Lücke“ vom 18. bis 19.6. ist auf Arbeiten an der Ausgasanlage zurück zu führen.

Die Sättigungs-Messung im Anstrom der Ausgasungsanlage steuert nun die Ventile für die O<sub>2</sub> Zufuhr. Im Abstrom werden zur Ueberwachung der Anlage die Sättigung (zur Sicherheit mit 2 Sonden) und O<sub>2</sub> ebenfalls kontinuierlich gemessen. Zusätzlich löst ein starker Anstieg der Quellschüttung eine

verstärkte O<sub>2</sub> Zufuhr aus. Wie Figur 1 klar zeigt, ist aber der Absolutwert der Schüttung kein gutes Mass für die Gassättigung.

Was wir vor 10 Jahren aus rein wissenschaftlicher Neugier begonnen haben, hat damit zu einer praktischen Anwendung geführt.

### **Andere Fälle von Gasübersättigung**

Einige für Fischspezialitäten bekannte Restaurants in der Region Gruyère hielten bis vor einigen Jahren einen Vorrat an lebenden Forellen in einem kleinen Aquarium. Durch den steten Zufluss aus dem Trinkwassernetz wurde genügend Sauerstoff zugeführt. Wiederholt kam es zu zunächst unerklärlichem Fischsterben in diesen Aquarien. Als Grund dafür stellte sich dann eine massive Gasübersättigung im Trinkwasser heraus. Nach Arbeiten am Netz war unter hohem Druck wieder Wasser in noch Luft enthaltende Leitungen eingeleitet worden.

Wenn solch übersättigtes Wasser z.B. zur Spülung neuer Leitungen in einen Bach abgeleitet wird, kann das zu einem rätselhaften Fischsterben führen. Man sucht dann nach Verunreinigungen und findet keine.

Massive Gasübersättigung findet sich auch im Wasser der Absetzbecken bei Bohrungen mit Druckluftspülung. Falls der Ueberlauf dieser Becken in einen Bach abgeleitet wird sind die Fische akut gefährdet.

Druckluftspülung oder „air-lift“ bei Grundwasserbohrungen kann auch noch einen ganz anderen negativen Effekt haben. Das eingepresste Luft/Wasser Gemisch verdrängt einen Teil des Wassers aus den Poren. Da dieses Gemisch stark übersättigt ist, bilden sich im Boden oder im Gestein Luftblasen, die sich nur sehr langsam auflösen. Insbesondere bei gespanntem Grundwasser, bei dem kein Ausgleich mit der Atmosphäre möglich ist, kann das über Monate zu einer massiven Reduktion der Wasserpermeabilität führen (Manning et al. 2003). In dieser Zeit führen daher Pumpversuche zu völlig falschen Resultaten. Leider gibt es dazu kaum Untersuchungen. Die meisten Hydrogeologen haben keine Ahnung was Gasübersättigung ist und was sie bewirken kann. Allenfalls

haben sie etwas von „excess air“ bei Edelgasanalysen von Wasserproben gehört.

Noch weniger Hydrogeologen wissen, dass TDGP-Messungen Information über Transportvorgänge liefern können. Lesenswerte Ausnahmen sind die Arbeiten von Klump et al. 2008 und Babic 2014.

### **Literatur**

Domagoj Babic, (2014), Gas supersaturation,  $^{222}\text{Rn}$  and  $\text{CO}_2$  as tracers in karst water, PhD thesis, University of Neuchatel, Switzerland, 2014 (<http://doc.rero.ch/record/232549/files/00002424.pdf>)

Wesley J.Ebel and Howard L.Raymond (1976),  
Effect of Atmospheric Gas Supersaturation on Salmon and Steelhead Trout of the Snake and Columbia Rivers. Mar.Fish.Rev. 38/7, 1-14, 1976

Stephan Klump, Olaf A. Cirpka, Heinz Surbeck and Rolf Kipfer (2008),  
Experimental and numerical studies on excess-air formation in quasi-saturated porous media, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 44, 2008

Andrew H.Manning, D.Kip Solomon and Amy L.Sheldon (2003),  
Application of a Total Dissolved Gas Pressure Probe in Ground Water Studies, GROUND WATER, Vol 41, No 4, pp 440-448