Gasübersättigung in Flüssen? Messung, Ursachen und Auswirkungen – Ein internationales Forschungsprojekt untersucht Verbreitung und Umwelteffekte

Ulrich Pulg · Sebastian Stranzl · Beatrice Wagner · Peter Flödl · Christoph Hauer

Online publiziert: 27. Januar 2020
 © Der/die Autor(en) 2020

Zusammenfassung Künstliche Gasübersättigung in Fließgewässern und die dadurch verursachte Gasblasenkrankheit bei aquatischen Organismen ist in Europa wenig beachtet. Neue Forschungsergebnisse in Norwegen, China und Nordamerika zeigen jedoch, dass Gasübersättigung verursacht durch Dämme oder Wasserkraftwerke weitaus verbreiteter ist als bisher angenommen. In Norwegen wurde künstliche Gasübersättigung in 12 von 16 untersuchten Wasserkraftwerken nachgewiesen. Dabei kam es in 10 Fällen zu Fischsterben. Ursache ist der Eintrag von Luft in die Zuleitungen, welche sich unter Druck im Wasser löst. In vielen Fällen kann die Gasübersättigung vermieden werden, beispielsweise mit ausreichender Dimensionierung von Kraftwerkeinläufen und Rechenanlagen, Alarmsystemen und Deflektoren. Umwelteffekte und die Toleranz heimischer Arten sind in Europa jedoch kaum erforscht. Das Gleiche gilt für die Verbreitung künstlicher Gasübersättigung in Europa sowie für kosteneffektive Methoden zu ihrer Vermeidung an bestehenden Anlagen. Im vorliegenden Fachartikel werden verschiedene Aspekte der Gasübersättigung thematisiert. Neben einer Beschreibung der physikalischen Prozesse werden sowohl

die biologischen Auswirkung als auch Messmethoden und mögliche Maßnahmen präsentiert. SUPERSAT, ein neues internationales Forschungsprojekt mit österreichischer Beteiligung, soll nun wissenschaftliche Erkenntnisse zu Umwelteffekten, Verbreitung, Umfang und Vermeidung der Gasübersättigung in Flüssen liefern.

Schlüsselwörter Gasübersättigung · Wasserkraft · Umwelt · Fische · Invertebraten

Gas supersaturation in rivers? Detection, causes and impacts—An international research project investigates distribution and environmental effects

Abstract Artificial gas supersaturation in rivers and the related gas bubble disease of aquatic organisms is an environmental issue which has been almost neglected in Europe. Recent research results of Norway, China and North America, however, show that supersaturation caused by dams and hydroplants is more frequently distributed than expected. In Norway supersaturation was detected in 12 of 16 investigated hydropower plants. In ten of this case studies fish kills were the consequence of reservoir operation by the intake of air which was dissolved by pressure. In many cases, supersaturation can be avoided by redesigning intake structures, alarm systems or deflectors. Environmental effects and studies on autochthonous species in Europe concerning supersaturation are almost completely lacking. The distribution and extent of gas supersaturation in Europe as well as cost-effective mitigation measures at existing structures is largely unknown.

The presented research article presents various aspects of supersaturation are presented. Starting with the

description of the physical processes and the impacts on aquatic biota, measuring methods as well as possible mitigation measures are described. SUPERSAT, a new international research project, is introduced. The project includes Austrian partners and aims to research environmental effects, distribution and extent of gas supersaturation in rivers as well as mitigation measures.

Keywords Gas supersaturation · Hydropower · Environment · Fish · Invertebrates

1 Einleitung

Weltweit unterliegen viele Fließgewässer multiplen Veränderungen, die erhebliche Effekte auf die Ökologie und Nutzungsmöglichkeiten der Flüsse haben. Gut untersuchte und auch teilweise in internationalen Richtlinien adressierte Stressoren sind die Schifffahrt, wasserbauliche (hochwassertechnische) Gewässerregulierung und die Wasserkraft, mit Sunk/Schwall, Restwasser und Staubeinflussung. Hinzu kommen Verschmutzung, Auswirkungen intensiver landwirtschaftlicher Nutzung und die einzugsgebietsübergreifenden Aspekte des Sedimentmanagements. Vermehrt finden sich auch Hinweise zu Auswirkungen bestimmter fischereilicher Bewirtschaftung.

Das Auftreten und die möglichen Auswirkungen von Gasübersättigungen in Fließgewässern sind in Europa jedoch kaum bekannt. Aus diesem Grund wird in diesem Fachartikel die Gasübersättigung (i) basierend auf den physikalischen Grundlagen, über (ii) die biologischen Auswirkungen hin zu (iii) möglichen Managementmaßnahmen vorgestellt. Weiters werden Messtechnologien präsentiert, um eine mögliche Gasübersättigung zu detektieren und in Zukunft reduzieren zu können.

Dr. U. Pulg (✉) · S. Stranzl
 NORCE LFI (Norwegian Research Center, Laboratory for Freshwater Ecology and Inland Fisheries),
 Nygårdsgaten 112, 5006 Bergen,
 Norwegen
ulpu@norce-research.no

DI B. Wagner · DI P. Flödl, B.Sc. ·
 PD DI Dr. C. Hauer
 CD-Labor für Sedimentforschung und -management, Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung, Universität für Bodenkultur Wien, Muthgasse 18, 1190 Wien, Österreich

1.1 Gasübersättigung

Gasübersättigung in Wasser ist allseits bekannt und wird als populäres Geschmacksmittel in sprudelnden Getränken eingesetzt, meist als CO₂-Übersättigung. Die Löslichkeit von Gasen in Wasser ist proportional zum Druck des Wassers (Henry 1803). Löst man Gas in Wasser und reduziert man den Druck, z. B. indem man den Schraubverschluss einer Mineralwasserflasche öffnet, ist das Wasser mit Gas übersättigt. Es bilden sich Gasblasen, die aus der Flüssigkeit entweichen, bis sich wieder ca. 100 % Gassättigung einstellen. Auch durch Temperaturerhöhung kann Gasübersättigung entstehen, denn die Löslichkeit von Gasen in Wasser ist neben druck- auch temperaturabhängig, wärmeres Wasser kann weniger Gas lösen.

Auch in der Fischzucht ist Gasübersättigung seit langem bekannt – und gefürchtet (Marsh und Gorham 1905; Hoppe-Seyler 1896). Sie verursacht die Gasblasenkrankheit, welche oft tödlich für Fische verläuft. Es bilden sich Gasbläschen im Gewebe und den Kapillaren, welche direkte Verwundungen hervorrufen und Blutadern verstopfen und sprengen können (Abb. 5). Der Effekt ist vergleichbar mit der Taucherkrankheit bei Menschen. Bereits geringfügige Gasübersättigung von 103 bis 105 % kann in den engen Verhältnissen der Fischzucht zu erhöhter Sterblichkeit führen. Werte über 110 % führen oft zu akutem Fischsterben. Reine Sauerstoffübersättigung wird von Fischen besser vertragen, aber auch sie kann bei hoher Konzentration zur Gasblasenkrankheit führen. Oft sind es jedoch Gasgemische, die in Lösung treten. Bei gelöster Luft bedeutet das einen hohen Stickstoffanteil (in Luft ist der Anteil bei ca. 79 %, gelöst in Wasser bei ca. 63 %). Es ist der Totaldruck aller gelösten Gase (total gas pressure, TGP) der die Blasenbildung verursacht, daher ist das Gesamtgasgemisch entscheidend für die Blasenbildung (Weitkamp und Katz 1980) und nicht nur der Stickstoff, wie teils immer noch angenommen wird (Pulg et al. 2018a).

1.2 Messtechniken

Gassättigung wird mit einem Weiss-Saturometer gemessen, das den Druck gelöster Gase in einem gaspermeablen Schlauch unter Wasser erfasst (Colt 1983). Gleichzeitig wird der atmosphä-

rische Druck an der Wasseroberfläche gemessen und der Gasdruck im Wasser dazu in Relation gesetzt. Bei der üblicherweise guten Durchlüftung des Wassers in Flüssen entspricht der Gasdruck im Wasser dem über der Wasseroberfläche, die Gassättigung beträgt 100 % TGP. Verschiedene Produzenten bieten Messgeräte an, meist mobile Handgeräte für die Fischzucht. In Flüssen werden jedoch weitaus robustere Messgeräte benötigt, die starke Temperaturschwankungen, hohe Fließgeschwindigkeiten, Vereisung und Eisgang, Sedimenttransport und Trockenfallen tolerieren. Sonden und Kabel müssen unter Wasser montiert werden, sodass auch bei Niedrigwasser gemessen werden kann. Zusammen mit Fisch & Wassertechnik entwickelten wir den GhPa-Saturometer zu einem freilandtauglichen Messgerät weiter. Dazu wurden robustere Silikonschläuche als Gasmembran verwendet, welche Wasserdruck- und Temperaturschwankungen tolerieren sowie unempfindlich gegen Kondenswasser im Inneren sind. Sonden und Kabel wurden von Tauchern mit Rohren und Schutzschläuchen an Ufer und Flussgrund fixiert. Messdaten werden mittels GSM auf einen Server übermittelt. Mit diesem System erreichten wir eine Lebensdauer in geschleibeführenden Flüssen bis zu 2 Jahren, in einem Falle hielt die Montage einem 200-jährlichen Hochwasser stand. Die Messgenauigkeit betrug ± 10 hPa (ca. ± 1 % TGP bei Meereshöhe).

Partialgasdrücke der wichtigsten gelösten Gase können mittels Zusatzsonden gemessen (O₂, CO₂) oder berechnet werden (N₂). Aufwendiger, aber hochgenau sind Messungen mit Gaschromatographen.

1.3 Natürliche Gasübersättigung in Gewässern

Weniger bekannt ist, dass Gasübersättigung auch in Gewässern vorkommen und Gasblasenkrankheit bei Fischen und Wirbellosen hervorrufen kann. Luftübersättigung kann natürlicherweise in tiefen Gumpen mit starker Lufteinmischung durch Wasserfälle auftreten. Auch bei Hochwässern und dem damit einhergehenden höheren hydrostatischen Druck im Fluss kann Luftübersättigung entstehen, wenn gleichzeitig Luft eingebracht wird, etwa in Rauschen, Kaskaden, Schluchten und Wasserfällen (Weitkamp und Katz 1980; Pulg et al. 2018a). Es sei betont, dass

reine Lufteinmischung in geringen Tiefen (<1 m), wie an vielen Wasserfällen und Rauschen üblich, nicht zu Gasübersättigung führt, denn die Luft wird gleichermaßen gelüftet wie gelöst und das Lösungspotenzial ist nicht wesentlich gesteigert. Erst bei Lufteintrag in größeren Tiefen macht sich ein Effekt bemerkbar (oft >5 m). Auch bei starker Erwärmung von Gewässern sowie stärkerer Photosynthese kann Gasübersättigung natürlich entstehen, hier sind es oft einzelne Gase, die in Lösung treten z. B. O₂ und CO₂.

1.4 Künstliche Gasübersättigung in Gewässern

Gasübersättigung kann überall dort entstehen, wo Gas und Wasser unter erhöhtem Druck gemischt werden und der Druck danach wieder reduziert wird. Das kann in Wasserkraftwerken der Fall sein (Heggberget 1984; Berg 1992; Pulg et al. 2016) oder unterhalb von Dämmen mit großen Fallhöhen in großen Flüssen (Ebel 1969; Weitkamp und Katz 1980; Feng et al. 2010). In Norwegen wurde beispielsweise von Wasserkraftwerken verursachte Gasübersättigung an 12 von 16 Flüssen nachgewiesen. In 10 Flüssen war die Gasübersättigung so hoch, dass Fischsterblichkeit auftrat, teils in Form akuter Fischersterben und fischfreier Zonen (0,3 bis 4 km). Im Fluss Otra (Abb. 1) wurde außerdem eine reduzierte Dichte und Biodiversität von Makrozoobenthos aufgrund künstlicher Gasübersättigung nachgewiesen (Pulg et al. 2018a). Die Flüsse waren nicht zufällig ausgewählt worden, es bestand ein Anfangsverdacht. Die Verfasser schließen daher nicht, dass 75 % aller kraftregulierten Flüsse betroffen sind. Es sei jedoch klar darauf hingewiesen, dass das Phänomen oft unterschätzt wird und weiter verbreitet ist als angenommen. Ursachen dafür sind einerseits mangelndes Wissen und Bewusstsein. Andererseits werden Gasübersättigung und Gasblasenkrankheit in freien Gewässern leicht übersehen, denn sie kommen oft nur periodisch vor und häufig in Zusammenhang mit Hochwässern. Gasübersättigung ist meist nicht direkt sichtbar, außer bei hohen Konzentrationen (milchige Färbung des Wassers und Sprudeln, ab ca. 140 % TGP, Abb. 2) und geschädigte Fische werden rasch weggespült und gefressen. Lediglich akute Fischsterben, ausgedünnte Fischbestände und hohe Konzentrationen

Abb. 1 Typische Ganglinie der Totalgassättigung (% TGP) im Fluss Otra am Kraftwerksauslauf sowie 1, 8 und 11 km flussabwärts

Abb. 2 Kraftwerksauslauf in der Otra mit 166 % TGP-Sättigung und milchiger Trübung aufgrund von Blasenbildung. (Foto: Pulg)

nen sind auffällig – aber auch diese wurden mangels Wissen nicht immer der richtigen Ursache zugeordnet (Pulg et al. 2018a).

2 Biologische Effekte

2.1 Subletale Effekte

In der Literatur wird zwischen subletalen und letalen Effekten unterschieden (Antcliffe et al. 2003). Subletale Effekte

bei Salmoniden (lachsartigen Fischen) wurden üblicherweise bei 103 bis 112 % TGP gemessen. Zu ihnen gehören Bläschenbildung, erhöhter Stress, Bildung offener Wunden und Sekundärinfektionen (Abb. 3). Bei lang anhaltender Übersättigung entstehen chronische Effekte. Die Schäden sind reversibel, wenn die Übersättigung aufhört, allerdings besteht danach oft eine erhöhte Anfälligkeit für Gasblasenkrankheit. Effekte hängen von Exponierung, Tem-

peratur, Tierart, Größe und vor allem von der Wassertiefe ab (Weitkamp und Katz 1980). Da die Löslichkeit der Gase vom Umgebungsdruck beeinflusst wird (Henry 1803), können Fische Gasübersättigung in tieferem Wasser kompensieren. Als Faustregel gilt, dass per 1 m Wassertiefe 9,7 % TGP kompensiert werden können (Pleizier et al. 2019). Das heißt, Wasser mit 110 % TGP wirkt auf Fische in 1 m Tiefe wie rund 100,3 % gesättigtes Wasser. 200 % TGP können somit in 10,30 m Tiefe kompensiert werden. In natürlichen Gewässern können Fische daher übersättigtem Wasser teilweise ausweichen, wenn ausreichende Wassertiefen gegeben sind. In flachen Gewässerstrecken und beengten Zuchten hingegen ist das nicht der Fall und daher sind hier oft bereits geringe Übersättigungen gefährlich und die Schäden größer.

2.2 Letale Effekte

Akut letale Effekte wurden bei Salmoniden in flachen Gewässern ab ca. 108 bis 110 % TGP gemessen. Cypriniden scheinen etwas mehr zu vertragen. Die Datengrundlage ist jedoch dünn. Bisher wurde vor allem die Toleranz pazifischer Salmoniden (*Onchorhynchus spec.*, darunter die Regenbogenforelle), einiger asiatischer Cypriniden sowie weniger Invertebraten erforscht (Dawley 1996; Liu et al. 2013; Nebeker 1976). Von europäischen Fischarten gilt nur die Toleranz von Atlantischem Lachs als teilweise erforscht. Die Toleranzen an-

Abb. 3 Geschädigte Forelle mit direkten Symptomen (Froschaugen) und indirekten Effekten (Pilzbefall). (Foto: Pulg)

Abb. 4 Sekundärer Bacheinlauf, hier wird bei Hochwasser Luft mitgerissen und in das Kraftwerk transportiert. (Foto: Pulg)

derer aquatischer Arten in Europa sind unbekannt und aufgrund mangelnder Alternativen wird oft vorausgesetzt, dass die Ergebnisse der pazifischen Salmoniden übertragen werden können (Pulg et al. 2016). Laborversuche mit Lachsjungfischen (15 cm) zeigen allerdings, dass der Atlantische Lachs

empfindlicher reagiert als pazifische Lachsarten (Pulg et al. 2018a).

2.3 Risikobewertung und Grenzwerte

Basierend auf Laborversuchen und Freilandstudien mit Lachsjungfischen erstellten Pulg et al. (2018a) eine Risikobewertung für Lachsjungfische auf-

Abb. 5 Lachs mit akuter Gasblasenkrankheit, im Bild eine Brustflosse mit inneren Gasblasen. (Foto: Wiers)

grund Gasübersättigung in flachen Gewässern (0,3 m Tiefe). Unter 105 % TGP rechnet man nicht mit Effekten. Bei langer Exponierung (>100 h) können subletale Effekte bei 105 bis 109 % TGP auftreten, Sterblichkeit ab 109 % TGP. Bei kurzer Exponierung <10 h wurden letale Effekte ab 114 % nachgewiesen. Für Fische in tieferem Wasser gilt die genannte Kompensationsformel, allerdings ist es praktisch nicht immer möglich, die Aufenthaltstiefe der Fische zu kennen. Es wird daher empfohlen, die Werte für Flachwasser einzusetzen, um das Risikopotenzial zu erfassen.

In einigen Staaten der USA sowie in Kanada wird 110 % TGP als Standardgrenzwert für Gewässer mit Tiefen über 1 m eingesetzt (Environment 1999). In Europa sind keine direkten Richtlinien oder Grenzwerte zur Gasübersättigung bekannt. Allerdings können biologische Effekte eventueller Gasübersättigung indirekt erfasst werden, beispielsweise durch reduzierte Dichten des Fisch- oder Invertebratenbestands. Maßnahmen dagegen setzen allerdings Kenntnisse über Gasübersättigung voraus.

3 Ursachen

Mögliche Ursachen der Gasübersättigung sind im Bereich der Wasserkraftnutzung zu finden, wobei hier zwischen (i) Bauwerk (Dämme) und (ii) dem Betrieb von Wasserkraftwerken unterschieden wird.

3.1 Dämme

Dämme können Gasübersättigung verursachen, wenn Hochwasser über die Dammkrone oder Hochwasserüberläufe/-entlastungen geleitet und dabei viel Luft mitgerissen wird, welche im Unterwasser unter hydrostatischem Druck gelöst wird. Je größer die Was-

sertiefe und je mehr mitgerissene Luft, desto höher kann die Gasübersättigung werden. Typische publizierte Werte liegen zwischen 120 und 150 % TGP (Beiningen und Ebel 1970; Ebel 1969; Ebel und Raymond 1976; Weitkamp 2008; Jiang et al. 2008; Li et al. 2009).

3.2 Wasserkraftwerke

Bei zu flachen oder unterdimensionierten Einlaufbauwerken kann Luft in Druckrohre und -Stollen eingesaugt werden, wo sie unter Druck gelöst wird und teils hohe Gasübersättigung im Auslauf verursacht (Stokkebo et al. 1986; Berg 1992). Unter 12 dokumentierten Wasserkraftwerken in Norwegen, die Gasübersättigung verursachen, war eines mit zu flachem Einlaufbauwerk und 6 mit unterdimensionierten Bacheinläufen (Abb. 4, ähnlich Tiroler Wehr) ausgestattet. Eines davon war das Kraftwerk Brokke am Fluss Otra, wo bis zu 176 % TGP im Auslauf gemessen wurden. Als Folge davon wurden Fischsterben und eine fischfreie Zone von 4 km Länge flussab des Turbinenauslasses registriert. Erst 30 km unterhalb des Kraftwerks waren die Gasübersättigungsereignisse von 170 % vollständig ausgelüftet (Pulg et al. 2018a).

In zwei Kraftwerken wurde Gasübersättigung von >120 bis 140 % durch teilweise Verstopfung des Einlaufrechens verursacht. Es entstanden Wirbel, die Lufteintrag bewirkten. Routinemäßige Belüftung von Francisturbinen zur Entlastung im Leistungsgrenzbereich führte in einem Fall zu Gasübersättigung von bis zu ca. 120 % TGP. In einem anderen Kraftwerk verursachte ein Lüftungsventil Lufteintrag und Fischsterben (Heggberget 1984). Kraftwerke mit Pelton turbinen verursachen selten eine biologisch riskante Gasübersättigung, weil eventuell gelöste Gase sehr gut durch die extreme Energieumwandlung auf den Turbinenschaukeln ausgelüftet werden. Allerdings kann es in tiefen Kraftwerksausläufen unterhalb von Pelton turbinen zur Lösung der mitgerissenen Luft kommen, was in zwei Fällen zu moderaten bis geringen Gasübersättigungen (105 bis 113 %) geführt hat (Pulg et al. 2018a). Werden Kraftwerke, die Gasübersättigung verursachen, im Schwallbetrieb gefahren, kann es zu gepulsten Gasübersättigungswellen kommen, dem sogenannten „Saturating“ (Pulg et al. 2016).

4 Lösungen

Als Möglichkeiten zur Reduktion des Lufteintrags und der Verminderung der schädlichen Wirkungen der Gasübersättigung werden mit derzeitigem Wissensstand zwei unterschiedliche Konzepte empfohlen: (i) die Vermeidung von Lufteintrag und (ii) die Lüftung von gasübersättigtem Wasser.

4.1 Vermeidung von Lufteintrag

Lufteintrag in unter Druck stehendes Wasser sollte grundsätzlich vermieden werden, wenn Gasübersättigung verhindert werden soll. Bei Dämmen in großen Flüssen können Leitbauwerke an den Hochwasserentlastungen dafür sorgen, dass weniger Luft eingetragen wird. Allerdings wird Gasübersättigung dadurch nur reduziert, nicht gänzlich vermieden. Kraftwerkeinlaufbauwerke sollten tief genug platziert und ausreichend dimensioniert werden. Bei Neubauten wird dies bspw. in Norwegen heute grundsätzlich von den Behörden gefordert. Bestehende Einlaufbauwerke können umgebaut werden, was zu erheblichen Kosten führen kann, z.B. ein Umbau zu Vakuum-einläufen. Diese bestehen aus Luken, die dafür sorgen, dass bei Hochwasser keine Luft eingetragen werden kann (Berg 1992). Allerdings kann Restluft im Schacht enthalten sein, die zu Gasübersättigung führen kann, jedoch von weitaus kürzerer Dauer. Bestehende Sekundäreinlaufbauwerke kann man außerdem drosseln, sodass der Abfluss zur Dimensionierung passt und auch bei Hochwasser keine Luft mitgerissen wird. Turbinenbelüftung zur Entlastung im Leistungsgrenzbereich ist bei Francislaufrädern weit verbreitet, kann aber angepasst werden. Hier empfiehlt es sich, Gassättigung zu messen, und falls kritische Werte entstehen, die Lüftung so zu ändern, dass sie zu unschädlichen Werten führt, beispielsweise durch kürzere und geringere Luftdosen. Das gilt auch für die Fälle, in denen Lüftung von Turbinen zur Sauerstoffanreicherung eingesetzt wird. Hier muss der Sauerstoffgewinn gegen das Risiko eventueller Totalgasübersättigung abgewogen werden. Totalgasmessungen sind daher ebenso erforderlich wie Sauerstoffmessungen.

Um Lufteintrag durch verstopfte Rechen zu vermeiden, beschreiben Pulg et al. (2018a) ein Alarmsystem, das aus Druckmessern am Kraftwerkseinlauf

und TGP-Saturometern am Auslauf besteht. Bei zu hohem Druckunterschied am Einlauf oder Gasübersättigung am Auslauf kann das Kraftwerk binnen Minuten gedrosselt werden, sodass kein weiterer Lufteintrag entsteht und der Rechen gereinigt werden kann. Das ist nebenbei auch im Sinn eines effektiven Kraftwerkbetriebs. Gasübersättigungsereignisse können so in ihrer Intensität begrenzt und auf wenige Minuten beschränkt werden, sodass kein oder ein nur geringes biologisches Risiko entsteht.

4.2 Lüftung von gasübersättigtem Wasser

Bei freiem Überfall von Wasser und Rieseln eines dünnen Wasserfilms über große Oberflächen lüftet übersättigtes Wasser gut aus. Das Prinzip wird in Lüftern in Fischzuchten verwendet. Auch in Gewässern kann die Auslüftung von Wasser über Schwellen und im Flusslauf berechnet und gezielt eingesetzt werden (Pulg et al. 2018b). Die Rauigkeit des Gewässerbetts, durch den d_{90} beschrieben, hat sich hier als eine wesentliche Kenngröße zur Auslüftung gezeigt. Weiters wurde an der Otra (Norwegen) ein Deflektor mit konkaver Oberfläche installiert, auf den ein Wasserstrahl im freiem Überfall auftrifft und versprüht wird (Abb. 6). Der Deflektor reduziert die Gasübersättigung mit 70 bis 80 % (Pulg et al. 2018a). Für einen Deflektor dieser Art ist jedoch ausreichend Gefälle notwendig.

5 Forschungsprojekt SUPERSAT

Ein neues internationales Forschungsprojekt soll die wichtigste offenen Fragen zur Gasübersättigung und deren biologischer Effekte beantworten. Dazu gehören die Erforschung der Toleranz ausgewählter europäischer Arten (Bachforelle, Flussbarsch, jüngere Stadien des Atlantischen Lachses). Auch die Verbreitung künstlicher Gasübersättigung soll erforscht werden. Dazu wird ein Risikomodell erstellt, das anhand von Kraftwerkstypen und hydraulischen sowie hydrologischen Eigenschaften die Wahrscheinlichkeit für Gasübersättigung in norwegischen, österreichischen und deutschen Kraftwerken berechnet. Die Ergebnisse werden dann in diesen drei Ländern durch Messungen ergänzt und validiert. Es wird außerdem ein Lösungskatalog erstellt, der Methoden zur Vermeidung und

Abb. 6 Deflektor am Tjurrmo Dam im Fluss Otra. Die Luke dient zur Beschickung der Restwasserstrecke mit einem Mindestwasserabfluss von 3 bis 5 m³/s. Der Deflektor sorgt für eine Belüftung des gasübersättigten Wassers und eine Reduzierung der Gasübersättigung um 70 bis 80 %. Die Werte unterhalb können daher unter 107 % TGB gehalten werden werden. (Fotos: Stranzl)

Reduzierung von Gasübersättigung in Gewässern zusammenfasst.

Das Projekt wird zur Gänze vom norwegischen Forschungsrat aus freien Mitteln gefördert. Es wird vom Norwegian Research Center (NORCE) LFI in Bergen geleitet. International beteiligt sind die BOKU Wien (Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung, Österreich), die Universität Koblenz-Landau (Deutschland) sowie die UBC (Kanada).

6 Schlussfolgerung

Dämme und Wasserkraftwerke können Gasübersättigung in Fließgewässern

verursachen, die zu subletalen und letalen Schädigungen von Gewässerorganismen führen. Das Phänomen der Gasübersättigung wurde in einzelnen Ländern bereits seit Jahrzehnten als Stressor für aquatische Ökosysteme untersucht. In Europa hingegen gibt es hierzu kaum wissenschaftliche Arbeiten oder Risikoanalysen. Aufgrund des hohen Ausbaugrads der Wasserkraft im Alpenraum und den Bestrebungen, diesen Ausbau in anderen Teilen Europas voranzutreiben, wird empfohlen, diesen potenziellen Stressor in Risikobewertungen mit aufzunehmen. In Ergänzung zu den bisherigen Erkenntnissen ist es notwendig, über

die Entstehung und Effekte der Gasübersättigung in Europa zu forschen und Maßnahmen zur Reduktion und Vermeidung zu entwickeln. Dies gilt auch für die Entwicklung und Validierung geeigneter Messinstrumente. Im vorliegenden Fachartikel wurden, dem Schwerpunkt dieses Themenhefts folgend, bereits neue Technologien vorgestellt, um (i) die Gasübersättigung in Flüssen dauerhaft zu messen und überwachen und (ii) durch die Anwendung von Deflektoren oder Alarmsystemen eine deutliche Verbesserung in Bezug auf Reduktion der Gasübersättigung zu erzielen. Das internationale Projekt SUPERSAT soll weitere Grundlagen für Umwelteffekte sowie Technologieentwicklung zur Überwachung und Vermeidung von Gasübersättigung liefern.

Funding Open Access funding provided by NORCE Norwegian Research Centre AS

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>. ■

Literatur

- Antcliffe, B. L., I. K. Birtwell, and L. E. Fidler (2003):** Lethal and sublethal responses of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and coho (*Oncorhynchus kisutch*) fry to elevated dissolved gas supersaturation and temperature. In Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2500. Fisheries & Oceans Canada, Habitat & Enhancement Branch.
- Beiningen, K. T., and W. J. Ebel (1970):** Effect of John Day Dam on dissolved nitrogen concentrations and salmon in Columbia river, 1968, Transactions of the American Fisheries Society, 99: 664–71.
- Berg, A. (1999):** Air entrainment and supersaturation of dissolved air in a shaft under atmospheric and reduced pressure conditions, Journal of Hydraulic Research, 30: 327–40.
- Environment, Canadian Council of Ministers of the (1999):** Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: Dissolved gas supersaturation. In Canadian environmental quality guidelines, edited by Canadian Council of Ministers of the Environment. Winnipeg.
- Colt, J. E. (1983):** The computation and reporting of dissolved gas levels, Water Research, 17: 841–49.
- Dawley, E. M. (1996):** Evaluation of the effects of dissolved gas supersaturation on fish and invertebrates downstream from Bonneville, Ice harbor, and Priest rapids dams, 1993 and 1994. In, 15. Seattle, Washington: Coastal Zone and Estuarine Studies Division, Northwest Fisheries Science Center.
- Ebel, W. J. (1969):** Supersaturation of nitrogen in the Columbia river and its effect on salmon and steelhead trout, FISHERY BULLETIN, 68.
- Ebel, W. J., and H. L. Raymond (1976):** Effect of Atmospheric Gas Supersaturation on Salmon and Steelhead Trout of the Snake and Columbia Rivers, Marine Fisheries Review, 38: 1–15.
- Feng, J., R. Li, K. Li, J. Li, and L. Qu. (2010):** Study on release process of supersaturated total dissolved gas downstream of high dam, Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering, 29: 7–12.
- Heggberget, T. G. (1984):** Effect of Supersaturated Water on Fish in the River Nidelva, Southern-Norway, Journal of Fish Biology, 24: 65–74.
- Henry, W. (1803):** Experiments on the quantity of gases absorbed by water, at different temperatures, and under different pressures, Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 93: 29–274.
- Hoppe-Seyler, F. (1896):** Ueber die Verteilung absorbierter Gase im Wasser des Bodensees und ihre Beziehung zu den in ihm lebenden Pflanzen und Tieren, Sch. Ver. Gesch. Bodensees, 24: 29–48.
- Jiang, L., J. Li, R. Li, and K. F. Li. (2008):** The supersaturation of dissolved gas in downstream of high dam, Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban)/Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 40: 69–73.
- Li, R., J. Li, K. Li, L. Qu, and J. Feng (2009):** Field observation of total dissolved gas supersaturation downstream of Ertan high dam. In IAHS-AISH Publication, 254–58.
- Liu, X. Q., K. F. Li, R. Li, and W. Jiang (2013):** Effect of chronic and acute exposure to total dissolved gas supersaturation on growth and survival in juvenile rock carp (*Procypris rabaudi* Tchang), Journal of Food Agriculture & Environment, 11: 1390–93.
- Marsh, M. C., and F. P. Gorham (1905):** The gas disease in fishes, Report of U.S. Bureau of Fisheries 1904: 343–76.
- Nebeker, A. V. (1976):** Survival of Daphnia, Crayfish, and Stoneflies in Air-Supersaturated Water, Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 33: 1208–12.
- Pleizier, N. K., C. Nelson, S. J. Cooke, and C. J. Brauner (2019):** Understanding gas bubble trauma in an era of hydropower expansion: How do fish compensate at depth?, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2019-0243>
- Pul, U., T. E. Isaksen, G. Velle, S. Stranzl, E. O. Espedal, K. W. Vollset, E. Bye-Ingebrigtsen, and B. T. Barlaup (2018a):** Gassovermetning i vassdrag – en kunnskapsoppsummering. In Uni Research Miljø LFI rapport 312. Uni Research Bergen. ISSN 1892–8889. Bergen.
- Pul, U., G. Velle, W. K. Vollset, S. Stranzl, and E. Olsen (2018b):** Gassovermetning i Otra og muligheter for avbøtende tiltak., Technical report. Uni Research Miljø LFI-rapport nr. 319, Bergen: 47 s.
- Pul, U., K. Wiik Vollset, G. Velle, and S. Stranzl (2016):** First observations of saturopeaking: Characteristics and implications, Science of The Total Environment, 573: 1615–21.
- Stokkebo, G., B. Berdal, G. Brox, E. Fleischer, G. Guttormsen, A. Kjeldsen, and K. Tvinneim (1986):** Bekkeinntak på kraftverkstunnele. Sluttrapport fra Bekkeinntakkomiteen (in Norwegian). In. Asker: Vassdragsregulantenenes forening.
- Weitkamp, D. E. (2008):** Total dissolved gas supersaturation biological effects, review of literature 1980–2007. In, 65. Bellevue, Washington: Parametrix.
- Weitkamp, D. E., and M. Katz (1980):** A Review of Dissolved Gas Supersaturation Literature, Transactions of the American Fisheries Society, 109: 659–702.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.