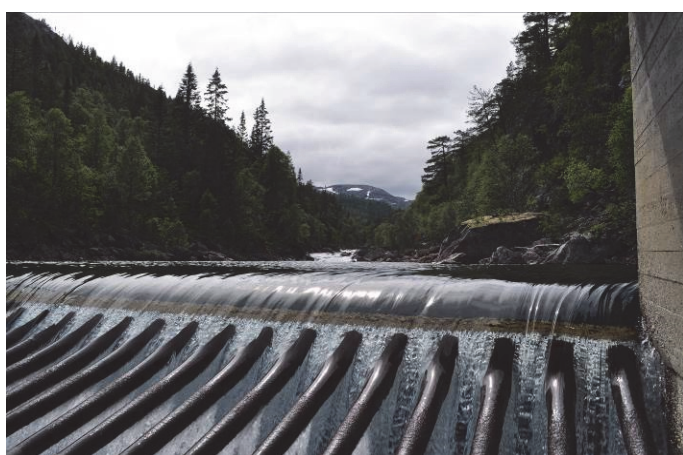


Gassovermetning i vassdrag – en kunnskapsoppsummering

Ulrich Pulg, Trond Einar Isaksen, Gaute Velle, Sebastian Stranzl, Espen O. Espedal,
Knut W. Vollset, Einar Bye-Ingebrigtsen, Bjørn T. Barlaup



Laboratorium for ferskvannøkologi og innlandsfiske (LFI)

I 2018 ble Uni Research en del av NORCE (Norwegian Research Center)

NORCE LFI, Nygårdsgaten 112, 5008 Bergen, Tel: 55 58 22 28

ISSN nr: ISSN 1892-8889

LFI-rapport nr: 312 , Miljødirektoratets referanse: M-1126/2018

Tittel: Gassovermetning i vassdrag – en kunnskapsoppsummering

Dato: 11.11.2018

Forfattere: Ulrich Pulg, Trond Einar Isaksen, Gaute Velle, Knut W. Vollset, Sebastian Stranzl, Espen O. Espedal, Einar Bye-Ingebrigtsen, Bjørn T. Barlaup

Bilder: Fotografier er tatt av forfatterne ved LFI hvis ikke det er nevnt annen fotograf under bildet.

Geografisk område: Norge

Finansiering: Miljødirektoratet

Antall sider: 70

Emneord: Gassovermetning, luftovermetning, gassblæresyke, overvåking, vannkraft, avbøtende tiltak

Sammendrag: Denne publikasjonen sammenfatter internasjonal kunnskap om gassovermetning og dens miljøeffekter i vassdrag. Dessuten presenterer vi resultater fra egen overvåking av gassmetning i ti norske elver og tåleforsøk med Atlantisk laks og bunndyr. Gassovermetning forekommer tidvis naturlig i vassdrag, og kan forårsakes av vannkraftverk. Kunstig gassovermetning knyttet til kraftverksdrift er ofte større og mer langvarig enn naturlig gassovermetning. Hovedårsak til gassovermetning i norske vannkraftverk er periodisk luftinndrag i underdimensjonerte bekkeinntak med francisturbiner. For første gang viser vi at også regulær lufting av francisturbiner og tilstopping av inntaksrister kan føre til gassovermetning. I dype elver kan også luftinndrag ved damanlegg og flomluker forårsake gassovermetning.

Det er dokumentert omfattende miljøeffekter av gassovermetning på vannlevende organismer, særlig i Nord- Amerika og Kina, men også i Norge. Gassovermetning kan føre til gassblæresyke hos fisk med konsekvenser som akutt fiskedød eller subletale effekter som kan gi redusert overlevelse på sikt. Det har også blitt påvist effekter på andre organismer, deriblant insekter og amfibier. For første gang vises at gassblæresyke kan også forekomme i døgnfluen *Baetis rhodani*. For de fleste organismer er toleransen til gassovermetning imidlertid ikke kjent og det gjelder særlig for europeiske arter. Ofte blir gassovermetning oversett som miljøfaktor i vassdrag. Det finnes ingen systematisk overvåking av gassovermetning i Norge eller Europa og i de fleste vassdrag er omfanget ikke kjent.

Våre resultater indikerer at gassovermetning er mer utbredd enn antatt. Gassovermetning knyttet til vannkraftverk ble funnet i seks av ti elver der vi mistenkte at det kunne forekomme gassovermetning. Dødelighet hos fisk som følge av gassblæresyke ble registrert i fire av disse elvene, og redusert tetthet og mangfold av bunndyr forkom i en elv som ble undersøkt. I tillegg er det kjent at kunstig gassovermetning har medført akutt fiskedød i minst seks andre norske vassdrag. Det er vanskelig å sette grenseverdier for akseptable gassovermetningsnivåer siden kunnskap om vannorganismenes toleranse i Norge og Europa er dårlig kjent. Basert på egne studier av Atlantisk lakseparr og fra et omfattende litteratursøk har vi utarbeidet en metode for å vurdere risiko for effekter på lakseparr som følge av gassovermetning. Avhengig av eksponeringstid og vanddyp vil det være høy risiko for dødelighet ved totalgassmetninger over 109-116%. Grunnet manglende kunnskap om toleransen til andre europeiske fiskearter bør det legges stor vekt på føre var prinsippet i håndtering av gassovermetning i vassdragsforvaltning dersom miljøskader skal unngås. Det trengs ny kunnskap om tåleevnen til flere arter og stadier for å kunne presisere og sikre risikovurderingen.

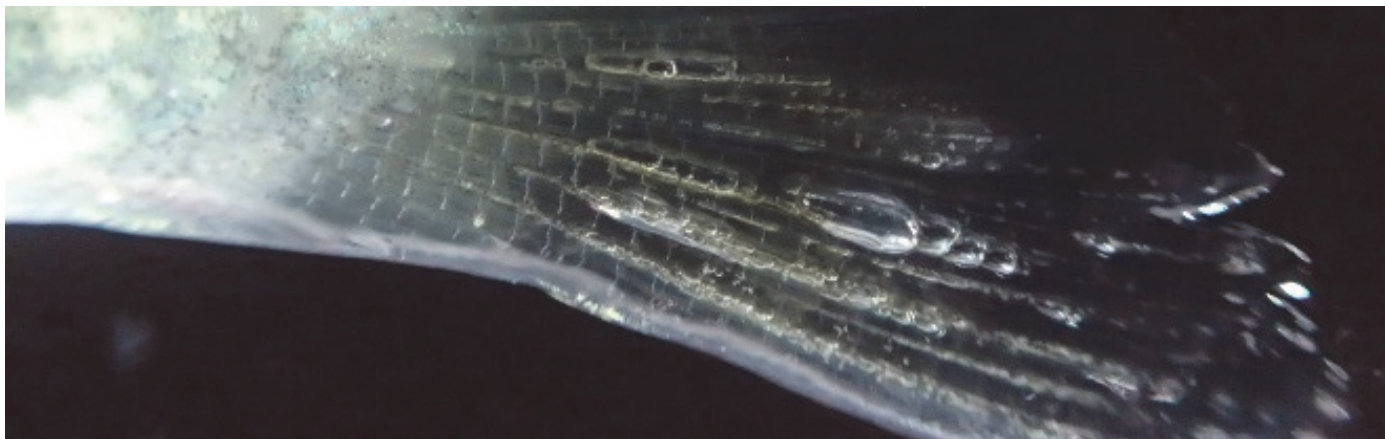
Flere tiltak kan iverksettes for å unngå gassovermetning. I nye kraftverk kan risiko for gassovermetning minimeres ved å utforme anlegget slik at luftinndrag unngås i alle driftssituasjoner. Lufting av turbiner bør overvåkes og gjennomføres slik at det ikke fører til uønsket gassovermetning. Ved eksisterende anlegg kan det etableres vakuuminntak eller regulerbare bekkeinntak, alarmsystemer med gassmetnings- og trykkmåling, automatiske ristrenser, dessuten tilpasning av drift og økt lufting av vann. En forutsetning for å kunne redusere miljøskadelig gassovermetning er å kartlegge omfanget av problemstillingen og å øke overvåkingen, særlig for vannkraftverk med høy risiko for gassovermetning. Dessuten bør kunnskapshullene angående biologiske effekter tettes.

Pulg, U., Isaksen, T.E., Velle, G., Stranzl, S., Espedal, E.O., Vollset, K.W., Bye-Ingebrigtsen, E., Barlaup, B.T. 2018: Gassovermetning i vassdrag – en kunnskapsoppsummering. Uni Research Miljø LFI rapport 312. Uni Research Bergen. ISSN 1892-8889

Innhold

1	Innledning.....	5
2	Forekomst av gassovermetning i vassdrag	6
2.1	Naturlig gassovermetning i vassdrag.....	6
2.2	Kunstig gassovermetning i vassdrag	6
2.3	Gassovermetning i norske vassdrag - undersøkelser utført av Uni Research Miljø (LFI) i perioden 2010 - 2018.....	8
2.3.1	Brokke kraftverk i Otra	8
2.3.2	Evenstad kraftverk i Nidelva	12
2.3.3	Hopselva kraftverk i Fusa	13
2.3.4	Evanger kraftverk og i Bolstadelven i Vossovassdraget.....	13
2.3.5	Rasdalen kraftverk i Rasdalselva.....	15
2.3.6	Hommelfoss kraftverk i Matreelva	15
2.3.7	Hellandsfoss kraftverk i Modalselva.....	17
2.3.8	Kvåle kraftverk i Dalsdalselvi	20
2.3.9	Mel kraftverk i Vetlefjordselvi	21
2.3.10	Myster kraftverk i Ekso	22
2.4	Gassovermetning i andre elver i Norge.....	24
2.4.1	Gassovermetning i Skibotneleva (Troms)	24
2.4.2	Gassovermetning i Nidelva (Agder)	24
2.4.3	Gassovermetning i Driva (Møre og Romsdal).....	25
2.4.4	Gassovermetning i Tafjord (Møre og Romsdal)	25
2.4.5	Gassovermetning i Masfjorden (Hordaland)	25
2.4.6	Gassovermetning i Førsvatnet, Kjelasvassdraget (Telemark)	25
3	Biologiske effekter av gassovermetning	25
3.1	Gassblæresyke hos fisk	25
3.2	Hva er kritiske nivåer av gassovermetning hos laks?.....	26
3.3	Andre akvatiske organismer	37
3.4	Trykk i omgivelse, kompensasjon og habitat (etiologi).....	39
3.4.1	Gassammensetning - bare farlig med nitrogen?	40
3.5	Risikovurdering av gassovermetning for fisk.....	41
3.5.1	Risikovurdering.....	42
3.5.2	Risikovurdering for fiskepopulasjoner i vassdrag i Norge	44
3.5.3	Ferskvannsfisk og bunndyr utenfor Europa	45
4	Årsak til gassovermetning.....	51
4.1	Luftinndrag ved demninger	51
4.2	Luftinndrag i bekkeinntak til vannkraftverk	51
4.3	Lufting av turbiner	51

4.4	Luftinndrag ved tilstopping av inntaksrist	52
4.5	Luftinndrag i overflateinntak og omløpstuneller	52
4.6	Luftinndrag i utløpskanaler.....	52
5	Overvåking – hvor, når og hvordan?	52
5.1	Metode	53
5.2	Kraftverkstyper og risiko for gassovermetning.....	54
5.3	Indikasjoner for gassovermetning i elver	54
6	Tiltak for å unngå eller redusere gassovermetning	55
6.1	Unngå luftinnblanding.....	55
6.1.1	Ristrenser, trykk- og gasslogger med alarmsystem.....	56
6.1.2	Regulering av bekkeinntak	56
6.1.3	Vakuuminntak.....	56
6.2	Lufting av overmettet vann	56
6.2.1	Peltonturbiner	56
6.2.2	Lufting av vann i elv og over terskler.....	57
6.2.3	Injeksjon av luft	60
6.2.4	Lufting av turbiner	61
6.3	Fortynning og drift.....	61
7	Status av kunnskap og forskningsbehov	61
7.1	Biologisk tåleevne.....	62
7.2	Biologisk mangfold og produksjon	64
7.3	Omfang av gassovermetning i norske vassdrag	64
7.4	Avbøtende tiltak	65
8	Sammendrag.....	67
9	Referanser.....	68



Gassblæresyke hos laks, små bobler er synlig i halefinnen (Foto: Sondre Kvalsvik Stenberg).

1 Innledning

Gassovermettet vann kan føre til gassblæresyke hos fisk og bunndyr med økt dødelighet i akutte tilfeller (høye nivåer; ofte over 109-116 % gassovermetning). Ved lavere nivåer og lengre eksponeringstid kan gassovermetning føre til subletale effekter (ikke direkte dødelige) som stress og sårdannelser med økt fare for infeksjonssykdommer. Gassovermetning kan oppstå når gass løses i vann under trykk og trykket deretter synker, samt ved raske temperaturforandringer i vannet. Overmetning kan dannes naturlig i dype turbulente elvepartier med luftinnblanding, fotosynteseaktivitet og oppvarming av vann. Menneskeskapt gassovermetning i vassdrag kan oppstå ved luftinndrag i vannkraftverk og ved dammer, kunstig oppvarming av vann og økt fotosynteseaktivitet (intens algevekst) grunnet eutrofiering som følge av overgjødning (forurensing; utslipp av organisk materiale og næringssalter). I kraftverk er årsaken vanligvis at luft trekkes inn i trykkrør eller i kraftverkstunnelen, der den løses i vannet under trykk. Bekkeinntak som trekker luft er kjente kilder for tilførsel av luftbobler i Norge. I klekkerier og akvakultur er gassovermetning både kjent og uønsket og kan oppstå når luft suges feilaktig inn i pumper og rørledninger eller dersom tilløpsvannet er overmettet. I vassdrag er gassovermetning mindre kjent og blir ofte oversett til tross for kjennskap til problemstillingen i litteraturen. Gassmetning blir ikke overvåket i de aller fleste regulerte elver i Europa. Retningslinjer som setter grenseverdier for gassovermetning mangler i Norge og Europa – i motsetning til Nord Amerika.

Vi har siden 2010 overvåket gassovermetning i elver og gassblæresyke hos fisk. Arbeidet har vist at dette forekommer oftere enn forventet. Vi har derfor sett et behov for å sammenstille og supplere kunnskap om gassovermetning, miljøeffekter og avbøtende tiltak. Dette er nødvendig dersom nasjonale miljømål i vassdrag, bl.a. formulert gjennom vannforskriften og kvalitetsnormer for villaks, skal oppnås. I 2017 fikk vi støtte til en slik kunnskapsoppsummering samt en tåleforsøk med Atlantisk laks av Miljødirektoratet.

Denne studien samler internasjonal og nasjonal kunnskap og bygger på egne erfaringer med overvåking av gassovermetning i vassdrag (kap. 2). Kunnskapen er supplert med et eget gjennomført eksperimentelt forsøk som beskriver toleransenivåer til Atlantisk lakseparr under gitte forhold (kap.3). Rapporten fortsetter med kunnskap om toleranse hos andre hovedsakelig nordamerikanske fiskearter og andre akvatiske organismer, samt råd om risiko (kap. 3). Deretter følger en sammenstilling av årsak til kunstig gassovermetning (kap. 4), anbefalte overvåkingsmetoder (kap. 5), råd om avbøtende tiltak (kap. 6) og identifisering av kunnskapshull (kap. 7).

2 Forekomst av gassovermetning i vassdrag

2.1 Naturlig gassovermetning i vassdrag

Gassovermetning kan forekomme naturlig (Harvey 1975; Weitkamp and Katz 1980). Det er blant annet registrert svært høye nivåer av gassovermetning i grunnvann, med verdier opptil 180% nitrogenovermetning. I andre tilfeller har overmetning med karbondioksid i grunnvannet ført til utblåsninger og såkalte kaldtvannsgesirer (Glennon and Pfaff 2004). Naturlig overmetning kan føre til gassblæresyke og fiskedød i klekkerier der overmettet vann (f.eks. grunnvann) brukes som vannkilde (Marsh and Gorham 1905; Weitkamp and Katz 1980). I elver ble gassovermetning for første gang beskrevet i 1928 som oksygenovermetning nedstrøms naturlige stryk og nedstrøms vannkraftverk (Jarnefelt 1949). Harvey (1975) beskriver tilfeller med opp til 134 % totalgassmetning (TDG, alle løste gasser, ofte luft) der luft var dratt ned i dype holer under fosser. Også intens algevekst og fotosynteseaktivitet kan føre til gassovermetning, og særlig av oksygen. Fra litteraturen kan man finne eksempler med nivåer opp til 327 % metning av oksygen (Harvey 1975). Gassenes løselighet i vann er korrelert med temperatur og trykk, noe som forklarer at hurtige temperaturendringer også kan føre til gassovermetning i kystvann og i ferskvannsdammer (Colt, Bouck, and Fidler 1986).

2.2 Kunstig gassovermetning i vassdrag

Kunstig gassovermetning og forklaring av årsakssammenhenger ble for første gang beskrevet i et offentlig akvarium tilhørende Bureau of Fisheries i Woods Hole, Massachusetts. Her førte lekkasje i rørsystemet til luftinndrag og gassovermetning. Det var også her gassblæresyke ble identifisert og korrekt beskrevet for første gang som «gas disease» i 1901 (Marsh and Gorham 1905). Senere ble det oppdaget flere tilfeller av gassovermetning i klekkerier forårsaket av pumper eller rørledninger som sugde inn luft, eller overmettet grunnvann. Fisken i disse klekkeriene fikk diagnosen gassblæresyke (Harvey, 1975). Overmetning av gasser i vann og gassblæresyke hos fisk i klekkerier, samt tiltak for å unngå dette, har i nyere tid blitt oppsummert og beskrevet (Marking 1987). Gassovermetning, gassblæresyke og avbøtende tiltak i klekkerier er i dag pensum i de fleste introduksjonsbøker om akvakultur og fiske sykdommer.

Fenomenet med kunstig gassovermetning i elver er derimot langt mindre kjent, selv om det er beskrevet i noen deler av verden. Regelmessige episoder med gassovermetning og gassblæresyke ble funnet nedenfor elvekraftverkene i Columbia og Snake river fra 1960- tallet (Arntzen et al. 2009; Beeman and Maule 2006; Beiningen and Ebel 1970a; Ebel 1969; Ebel et al. 1974). Her ble det målt nitrogenmetningen opp til 129 % (Ebel, 1969) og 143 % (Beiningen and Ebel 1970a). I disse elvene forekommer overmetning når det er høy vannføring over demningenes flomluker der luftbobler samtidig rives med og løses i de relativt store og dype elvene (flere meter) under hydrostatisk trykk. I Bighorn river (USA) ble luftinndrag ved sluser identifisert som kilde til overmetning og gassblæresyke (Colt, Bouck, and Fidler 1986). Også i Canada ble det tidlig funnet gassovermetning. Ved et vannkraftverk i Mactaquac, St. Johns River, New Brunswick førte nitrogenovermetning (125 % N₂ og 80 % O₂ ved 12°C) til gassblæresyke hos adulte Atlantisk laks (*Salmo salar*) og ål (*Anguilla rostrata*) (MacDonald and Hyatt 1973b). Etter egne beregninger tilsvarer dette 115,4 % TDG-metning. Årsaken var lufting av Kaplan-turbiner og en fallhøyde mellom 31,7 og 35,4 m. Lignende observasjoner med vannslipp i damanlegg som årsak har blitt rapportert fra Kina de siste årene, for eksempel

i Zumuzu elven (Feng et al. 2013; Liu et al. 2013) og i Yangze elven. Ved syv demninger i Yangze (mellom 50 og 300 m fallhøyde) ble det funnet opp til 142,5 % TDG (Qu et al. 2011).

I et kraftverk i Nidelva (Agder) observerte Heggberget (1984) og Thorstad et al. (1997) nitrogenmetning opp til 200 %, mest sannsynlig grunnet luft som ble sugd inn i en ventil i et omløp. Stokkebø et al. (1986) fant at høy vannføring i underdimensjonerte bekkeinntak kan være en vanlig årsak til uønsket luftinndrag i kraftverk. Dette kan føre til ukontrollerte utblåsninger og gassblæresyke hos fisk. Stokkebø et al. (1986) og Berg (1992) beskrev vakuuminntak som en løsning for å unngå gassovermetning i bekkeinntak med et eksempel i Driva.

Uni Research Miljø LFI har siden 2010 overvåket gassmetningsnivåer med varighetsloggere i 10 vassdrag: Otra, øvre Nidelva (Agder), Modalselva, Matreelva, Vosso, Hopselva, Ekso og Rasdalselva (Hordaland) og Vetlefjordselva og Dalsdalselvi (Sogn og Fjordane), Velle et al. (2017); (Gabrielsen et al. 2011; Pulg, Sebastian Stranzl, et al. 2016; Pulg et al. 2018b; Pulg, Barlaup, and Nordmann 2014; Pulg, Gabrielsen, and Normann 2013; Pulg and Stranzl 2015a; Pulg, Vollset, et al. 2016; Pulg and Stranzl 2015b). I tillegg kommer mange stikkprøver og kortvarige målinger i en rekke elver. Blant dem er Apeltunelva, Steinsvikelva, Bjoreio og Pollelva (Hordaland). Kunstig gassovermetning er registrert i 6 av 10 vassdrag (se kap. 2.3), blant annet i Otra der gassovermetningsbølger fra Brokke kraftverk transporteres opptil 30 km nedover i elven (Fig. 1). Også andre steder er det kjent at gassovermettet vann kan transporteres og ha ugunstige effekter flere titalls kilometer nedover elven før luften gasses ut (Weitkamp and Katz 1980; Heggberget 1984; Qu et al. 2011). Fra Norge er det også kjent at effektkjøring i vannkraftverk kan medføre gassovermetning. Dette ble beskrevet av Pulg m. fl. (2016) som registrerte karakteristiske bølger av gassovermettet vann forårsakes av effektkjøring i kraftverk Mel i Vetlefjorden.

I innsjøer har det blitt observert nitrogenovermetning opp til 141 % etter at vannet ble luftet for å øke oksygeninnholdet (Fast and Hulquist 1982). Størst var N₂- metningen i de dypeste delene av innsjøen (hypolimneon), der O₂- nivåene var lavest grunnet eutrofiering og anoksiske bunnforhold med anaerob nedbryting av organisk materiale. Beskrivelsen inkluderer ikke TDG, men egne beregninger indikerer lave til moderate nivåer ved overflaten (101-110 %). Fast and Hulquist (1982) diskuterer også muligheten til anaerob denitrifikasjon som kilde til N₂- overmetning i dypt vann, men kan ikke belegge dette med data. Overmetning og gassblæresyke hos fisk kan også oppstå under omfattende fotosynteseaktivitet, selv om en stor andel av løst gass vil være O₂ (Weitkamp and Katz 1980). Dette kan betraktes som menneskeskapt overmetning dersom fotosynteseaktiviteten er en følge av intens algevekst på grunn av forurensing og overgjødning i form av utslipp av næringssalter (nitrogen, fosfor) til vassdraget fra f.eks. landbruk, industri, kloakk e.l.

Etter et omfattende litteratursøk utført på flere språk i rammen av dette arbeidet ser vi at gassovermetning i elver knapt er kjent utenom USA, Kina, Canada og Norge. I store utbyggingsprosjekter i Amazonas, Mekon og på Balkan er temaet fraværende i miljøundersøkelser og konsekvensutredninger, selv om elvenes og dammenes størrelse sannsynliggjør betydelige nivåer av gassovermetning. Også i Kina har man i liten grad tatt hensyn til forhøyet gassovermetning før utbygging av elver. Her har alvorlige tilfeller med gassblæresyke og dødelighet hos fisk blitt oppdaget etter utbygningene og nå finnes det mange aktuelle kinesiske publikasjoner om emnet. I Norge anbefalte Blindheim et al. (1984) og den såkalte «komiteen for undersøkelse av gassovermetning» at gassovermetning bør kartlegges mer systematisk i vassdrag og at tiltak bør iverksettes der det er forhøye verdier. Dette ble i liten grad fulgt opp. De aller fleste vannkraftverk med mulig produksjon av gassovermetning blir fortsatt ikke undersøkt. Fiskedød som kan relateres til gassovermetning har blitt oppdaget mer eller mindre tilfeldig. Slike hendelser er imidlertid vanskelig å oppdage siden biomassen av fisk i næringsfattige norske elver ofte er lav og fordi overmetningsepisoder vanligvis sammenfaller med flomvannføring som gjør det vanskelig å observere død eller skadet fisk, se kap. 2.3.

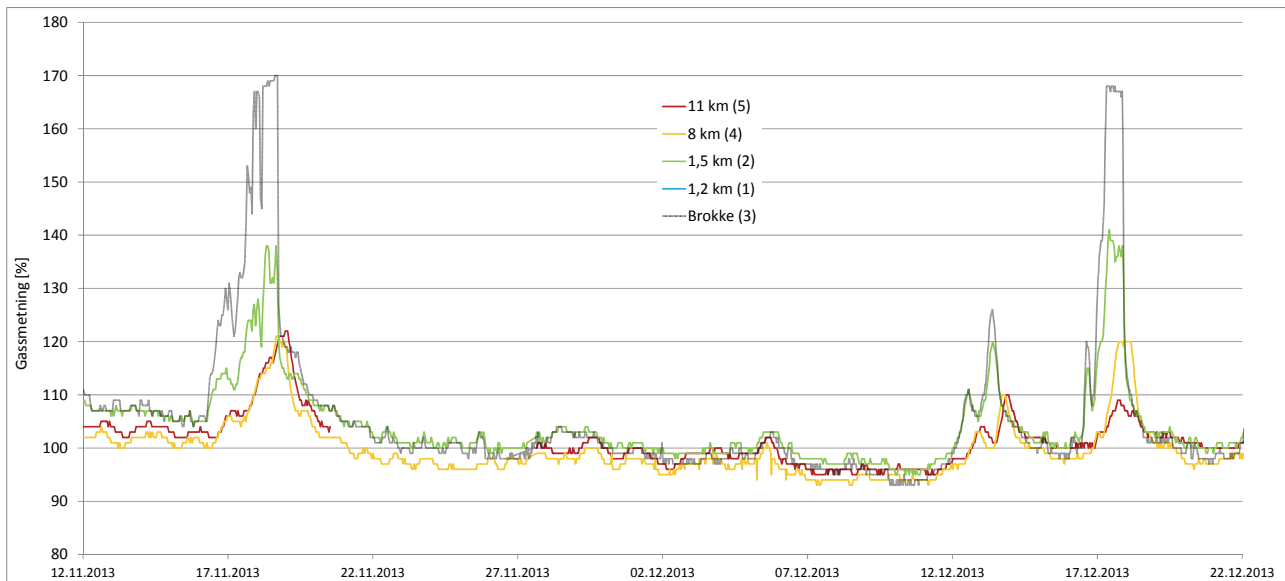


Fig. 1 Typisk gassmetningsforløp i Otra om høsten. Gassovermetningsbølger fra Brokke kraftverk kan følges til Tjurrmodammen 11 km nedstrøms Brokke (vist i figur), og delvis også helt til Ose 30 km fra Brokke. Overmetningen er forårsaket av nedbørshendelser med påfølgende høy vannføring og luftinndrag i bekkeinntak.

2.3 Gassovermetning i norske vassdrag - undersøkelser utført av Uni Research Miljø (LFI) i perioden 2010 - 2018

I det følgende beskrives resultater og erfaringer med gassovermetningsovervåking i ti norske vassdrag utført mellom 2010 og 2018. Gassovermetning knyttet til vannkraftverk ble funnet i seks av ti elver der vi mistenkte at det kunne forekomme gassovermetning vassdrag. I fire av tilfellene førte gassovermetning til dødelighet hos fisk. I etterkant beskrives seks andre kjente eksempler fra Norge der menneskeskapt gassovermetning har ført til gassblæresyke hos fisk. Med disse er det samlet sett ti dokumenterte tilfeller av fiskedød grunnet kunstig gassovermetning i Norge.

2.3.1 Brokke kraftverk i Otra

Gassmetning

I Otra ble gassmetningen logget nedenfor Brokke kraftverk i perioden fra 2012 til 2017 (Pulg, Vollset, et al. 2016). Kraftverket ble satt i drift i 1965 og har gradvis fått flere bekkeinntak. I dag er det 13 bekkeinntak som fører vann direkte til kraftverkets tunnelanlegg. I tillegg finnes det et magasin (Bossvatnet) med 300 m fallhøyde. Maksimum slukeevne er 136 m³/s fordelt på 4 francisturbiner, og med 330 MW maksimum ytelse (www.nve.no).

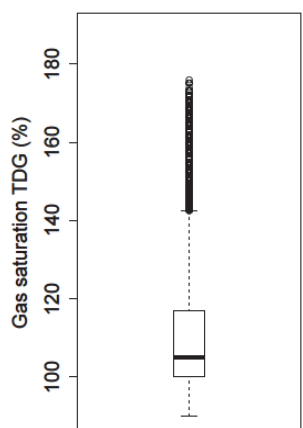
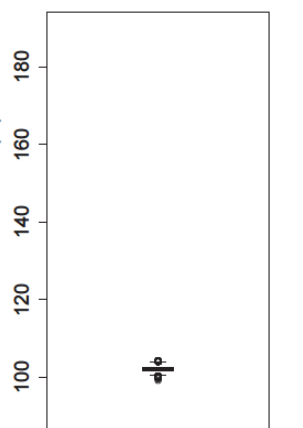
I perioder med høy vannføring i bekkeinntakene (etter mye nedbør, typisk i vårløsning) ble det registrert gassovermetning opp til 176 % TDG og med gjennomsnitt 111 % TDG (tabell 1). Lavest målte nivå var 90%. Vannet er lett undermettet når kraftverket kjøres fra magasinet 300 m høyere som har mindre atmosfærisk trykk. Medianverdi var 105 % TDG med 75-persentil lik 117 % TDG. Dette vil si at 25 % av tiden var gassmetningen over 117 % TDG. Registreringene viste svært høy gassovermetning med nivåer over 147 % TDG i 5 % av tiden. Et typisk års forløp er vist i Fig. 2 med en langvarig periode (4-8 uker) med høy

overmetning under vårløsning og uker eller dager med episoder under resten av året. Episodene skjer i forbindelse med nedbør og ved snøsmelting. Gassovermetningen luftes gradvis ut i elven nedstrøms kraftverket, men kan delvis transporteres over 30 km nedstrøms i Otra.

Årsak

Gassandelene i vannet tyder på oppløst luft som kilde til overmetning. Som årsak ble det identifisert at bekkeinntak river med seg luft ved høy vannføring. Det ble funnet hvilke inntak som sannsynligvis bidrar mest til gassovermetningen (Pulg, Vollset, et al. 2016).

Tabell 1. Gassovermetning ved Brokke kraftverk 2012-2017 med box-plots, persentiler og varighet.

River below hydroplant			Reference upstream hydropower plant		
 <p>Gas saturation TDG (%)</p> <p>180 160 140 120 100</p> <p>Brokke hydroplant</p>	Min	90 %	 <p>Gas saturation TDG (%)</p> <p>180 160 140 120 100</p> <p>Reference upstream</p>	Min	99 %
	Max	176 %		Max	104 %
	Average	111 %		Average	102 %
	x5	94 %		x5	101 %
	x25	100 %		x25	102 %
	x50	105 %		x50	102 %
	x75	117 %		x75	103 %
	x95	147 %		x95	103 %
	n > 110 %	84		n > 110 %	0
	t > 110 %	37,7 %		t > 110 %	0 %

n > 110 % = number of events larger 110 % TDG, t > 110 % = percentage of time larger 110 % TDG

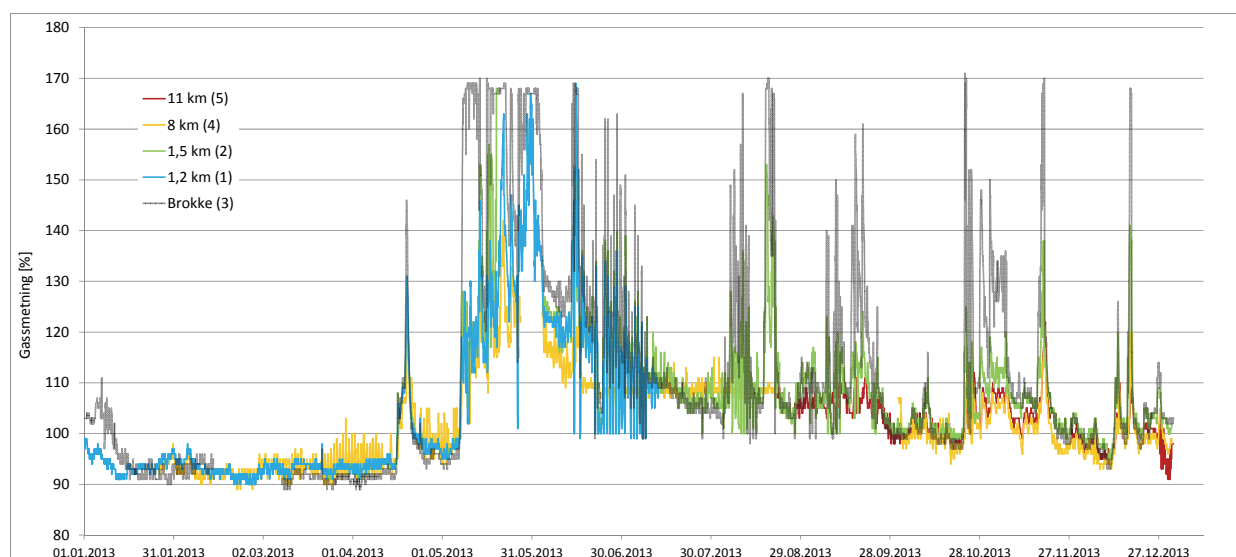


Fig. 2 Typisk forløp av gassmetning i Otra i utløp Brokke 2013 og fire stasjoner nedenfor.

Biologiske effekter

Gassmetningsverdien fra Brokke kraftverk er så høy at akutt gassblæresyke og fiskedød nedenfor kraftverket må forventes, noe observasjoner også har bekreftet. Fisk kan vandre inn i strekningen nedenfor kraftverket om vinter under lav vannføring og utvikle akutt gassblæresyke med betydelig dødelighet i perioder med overmetningsbølger, for eksempel under vårløsningen. Strekningen mellom kraftverket og Rysstadbassenget, et oppdemmet elvemagasin ca 4 km nedstrøms Brokke, var uten ørret under el-fiske befaring høsten 2012, bare ved bekkemunninger ble det funnet enkelte ørekyter. Nedenfor og ovenfor fantes ørret og et større antall ørekyte (Fig. 3). Den relikte og sterkt verneverdige laksen bleke (*Salmo salar*) forekommer i dag i Otra nedenfor Tjurrmoen dam (11 km nedstrøms Brokke) og Hekni kraftverk (19 km fra Brokke). Det er registrert gassmetningsnivåer på 100-120 % TDG i dette området, og det er derfor sannsynlig at blekepopulasjonen er påvirket. Også bunndyr er påvirket i av gassovermetning i Brokke. Det ble funnet signifikant lavere biologisk mangfold og lavere tetthet av bunndyr rett nedstrøms kraftverket enn 200 m ovenfor, og økende biologisk mangfold i suksessiv avstand fra Brokke (se også kap 4.3 og (Pulg, Sebastian Stranzl, et al. 2016; Pulg et al. 2018b; Velle et al. 2017)).

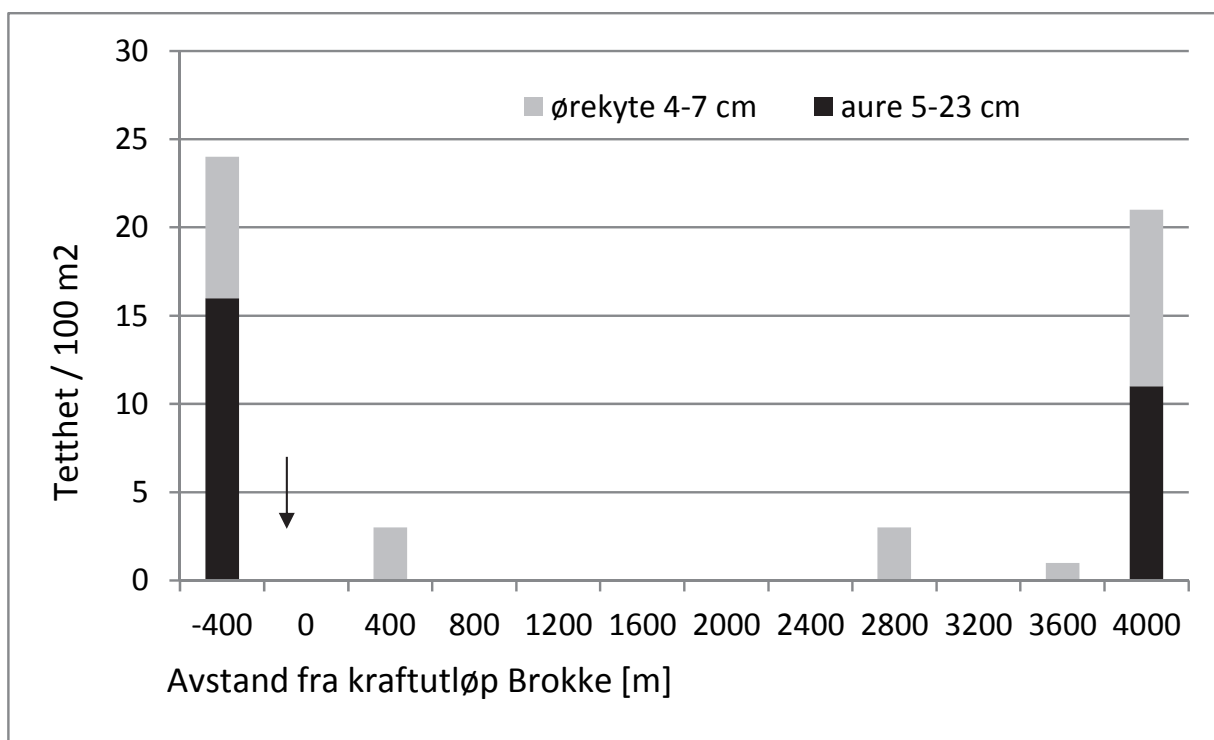


Fig. 3 Data fra el-fiske 30-31 oktober 2012. Ørret ble bare funnet ovenfor kraftutløpet og i Rysstadbassenget. Ørekyte fantes også innimellom, men i svært lave tettheter og samtlige ble funnet ved bekkemunninger.

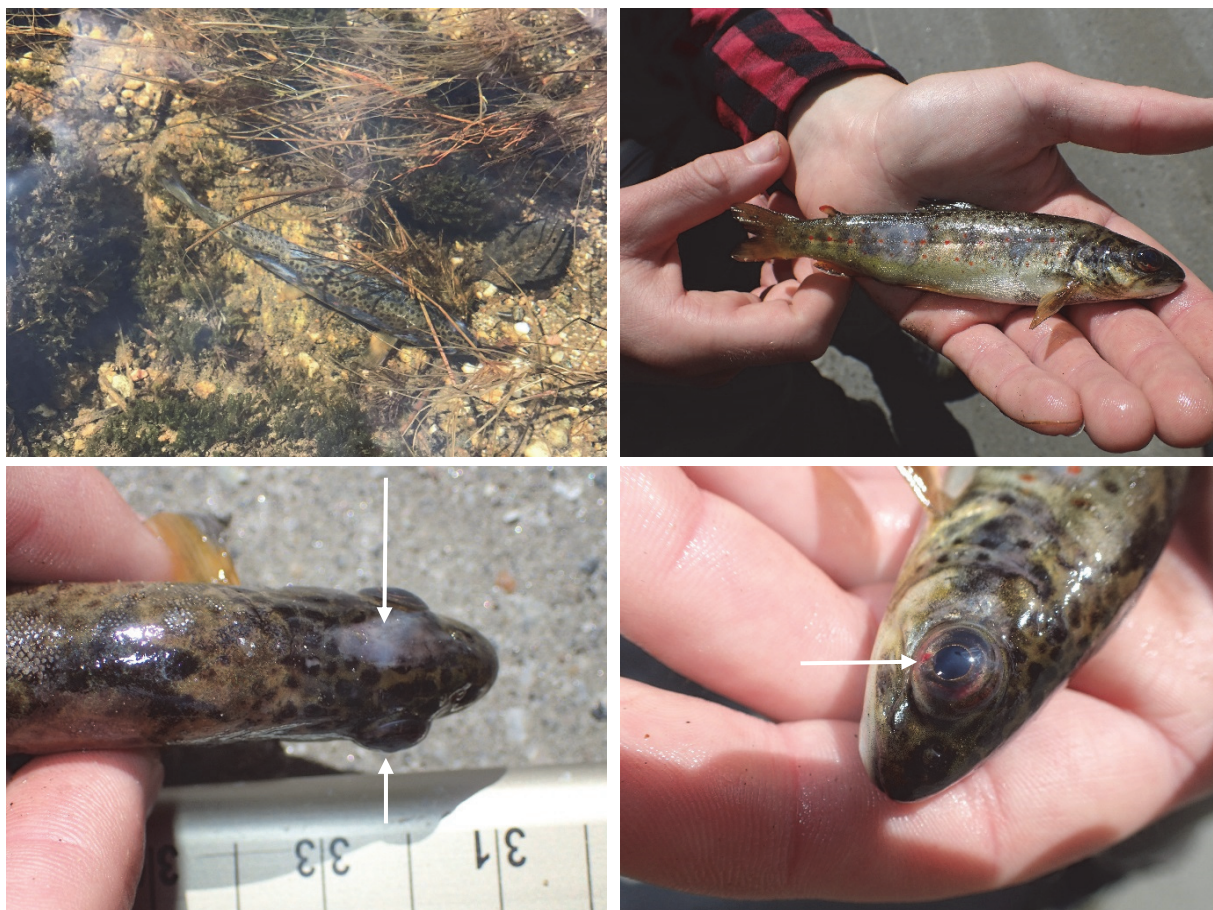


Fig. 4 Levende aure ble funnet ca. 20 km fra Brokke kraftverk., 04.07. 2017. Fisken levde, men hadde kliniske tegn på gassblæresyke (eksoftalmus; utstående øyner pga. trykk) og typiske følger av gassovermetning (blødninger, finneslitasje, sekundær infeksjon) som tyder på langtidseksponering av subletale nivåer av gassovermetning (Foto: E.O. Espedal, U.Pulg).

Mulige avbøtende tiltak

Pulg et al. (2018b) modellerte utgassing av vann i relasjon til hydrauliske forhold i Otra og beregnet at det var mulig å redusere overmetningen og påvirket område ved å luften gasen i vannet med økt ruhet i elven og frie overfall. En del av dette blir nå utprøvd i Tjurrmo dam, der minstevannet skal slippes via en ny deflektor som skal luften vannet bedre. Gassovermetningen i dagens blekehabitat vil reduseres dersom tiltakene fungerer. Det vil også være mulig å unngå gassovermetning ved erstatte dagens bekkeinntak med vakkuminntak (Berg 1992, Pulg et al. 2016) eller ved å redimensjonere bekkeinntakene tilstrekkelig. Dette ville medføre omfattende endringer og kostnader for kraftverket. Mere detaljer finnes i kap. 6.

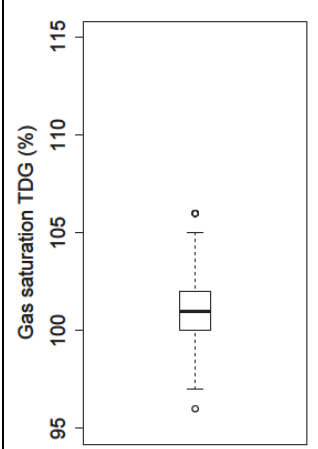
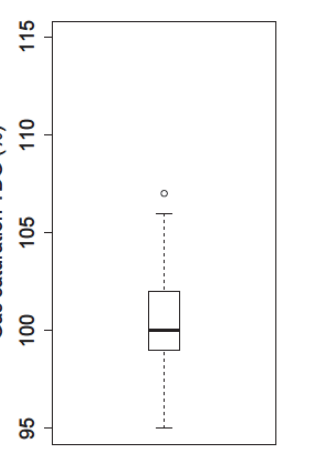
2.3.2 Evenstad kraftverk i Nidelva

Gassmetning

Gassmetningen ble logget nedstrøms Evenstad kraftverk i perioden fra 10.06 2016 til 25.06 2017 (Stranzl, Olsen, and Pulg 2017). Evenstad kraftverk er et elvekraftverk fra 1904 med 17,5 m fallhøyde. Maks slukeevne er 175,9 m³/s fordelt på tre francisturbiner og en Kaplan turbin (www.nve.no), noe som gir 24,7 MW i maksimum ytelse.

Det ble ikke registrert forskjellig gassovermetning nedenfor og ovenfor kraftverket. Maksimum verdi under loggingsperioden var 106 % TDG nedenfor kraftverket og 107 % TDG ovenfor. I gjennomsnitt var gassmetningen rundt 101 % TDG både ovenfor og nedenfor. Stranzl et al. 2018 konkluderer at kraftverket ikke har ført til gassovermetning i loggingsperioden. Det regnes derfor ikke med at kunstig gassmetning har effekter på biologien.

Tabell 2. Gassmetning ved Evenstad kraftverk 2016-2017

River downstream hydroplant			Reference upstream hydropower plant		
 <p>Eivindstad hydroplant</p>	Min	96 %	 <p>Reference upstream</p>	Min	94 %
	Max	106 %		Max	107 %
	Average	101,2 %		Average	100,6 %
	x5	99 %		x5	98 %
	x25	100 %		x25	99 %
	x50	101 %		x50	100 %
	x75	102 %		x75	102 %
	x95	104 %		x95	104 %
	n > 110 %	0		n > 110 %	0
	t > 110 %	0 %		t > 110 %	0 %

n >110 % = number of events larger 110 % TDG, t >110 % = percentage of time larger 110 % TDG

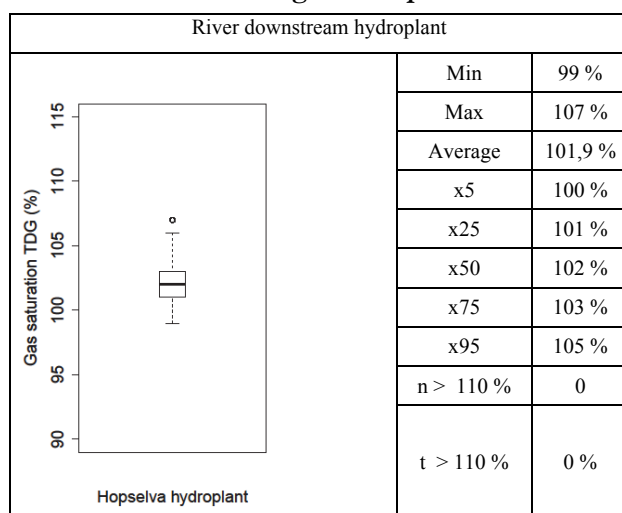
2.3.3 Hopselva kraftverk i Fusa

Gassmetning

Gassmetning ble logget i Hopselva nedenfor Hopselva kraftverk i perioden fra 05.05 2014 til 14.04 2015 (Pulg and Stranzl 2015b). Kraftverket er et småkraftverk som ble satt i drift i 2010 med 161 m fallhøyde. Maksimum slukeevne er 3,3 m³/s gjennom en peltonturbin, noe som gir 4,62 MW i maksimum ytelse (www.nve.no).

Det ble ikke funnet verdier av TDG som tilsier overmetning nedenfor kraftverket. TDG ble ikke målt ovenfor kraftverket, men gassmetningsnivåene kan betraktes som tilnærmet naturlig. Testkjøring av omløpsventilen førte til en liten endring i gassovermetning (+ 1 % TDG). Gjennomsnittsverdi var rundt 102 % TDG, minimum 99 % TDG og maksimum 107 % TDG i overvåkingsperioden. Pulg og Stranzl (2015) konkluderer at kraftverket kan ha ført til en liten økning i overmetning, men at endringen er så lave (1-2 %) at de ikke betraktes som biologisk relevant. Det regnes derfor ikke med at gassovermetningen har biologiske effekter.

Tabell 3. Gassmetning ved Hopselva kraftverk 2014-2015



n >110 % = number of events larger 110 % TDG, t >110 % = percentage of time larger 110 % TDG

2.3.4 Evanger kraftverk og i Bolstadelven i Vossovasdraget

Gassmetning

I Vossovasdraget ble gassmetningen logget ved utløpet til Evanger kraftverk og i elva ovenfor (Vosso), samt nedenfor i Bolstadelven i perioden fra 15.05 2015 til 30.12 2017 (Pulg, Stranzl, and Olsen 2018). Kraftverket ble satt i drift i 1969 og har en brutto fallhøyde på 770 m. Maksimum slukeevne er 53,8 m³/s gjennom tre peltonturbiner, noe som gir 330 MW i maksimum ytelse (www.nve.no).

Det ble målt lav til moderat naturlig gassovermetning i Vosso i overvåkingsperioden med 104 % median TDG, 104 % TDG i gjennomsnitt og maksverdi 111,5 % TDG under flømeperioder. Vannføringen domineres av Vosso i forhold til Evanger kraftverk (middel 75 % vann fra Vosso, og ved flom opptil 95 % for perioden fra 2014 til 2016) og naturlig gassmetning fra Vosso utgjorde hovedkilden til gassovermetning på stasjoner nedstrøms Vassenden og i Bolstadelva.

Evanger kraftverk tilførte noe kunstig gassovermetning til Vosso med 106 % TDG i median og gjennomsnitt, og 113,2 % TDG som maksimumsverdi. Medianverdiene var 1,9 til 3,3 % TDG høyere fra Evanger kraftverk enn i Vosso, maksimumsverdi var 1,7% høyere. Gassmetning fra Evanger kraftverk hadde likevel ingen målbar effekt på gassmetning i nedenforliggende stasjoner i Bolstadelva og på Vassenden fordi vannføringen ble dominert av Vosso.

Årsak

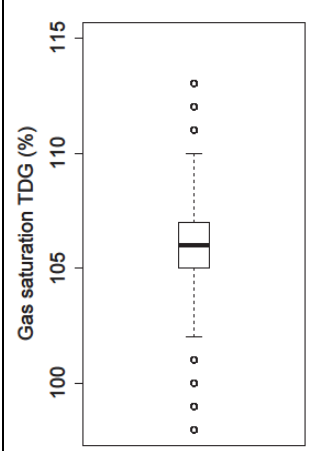
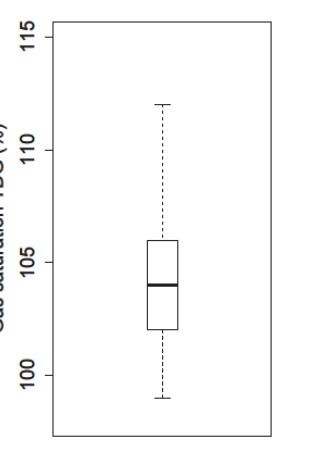
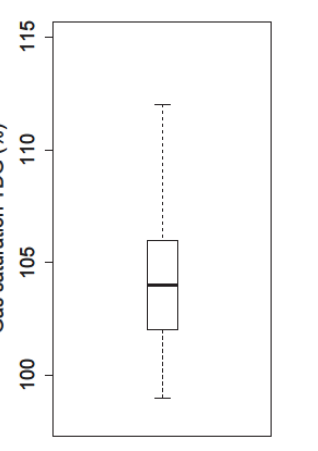
Målingen tydet på oppløst luft som kilde til gassovermetning i både Vosso og Evanger kraftverk. Overmetningen i Vosso var knyttet til vannføring og ble mest sannsynlig forårsaket av luft som løses i vann ved høyere hydrostatisk trykk i turbulent vann ved økt vannføring. Den kunstige gassovermetningen er mest sannsynlig forårsaket av luft som løses i vann i kraftutløpskanalen etter turbinpassasjen.

Biologiske effekter

Det ble ikke observert gassblæresyke eller tegn til påvirkning av verken vill laks eller aure (el-fiske, observasjoner under dykking, kontroll i ruser og smoltfelle). Burforsøk med levende laksesmolt viste at gassmetningen ikke førte til gassblæresyke (Stenberg et al. 2018). Risiko for gassblæresyke hos fisk vurderes som liten siden gassovermetning var liten til moderat og med kortvarige maksimumsverdier. Dessuten kan fisk i Evangervatnet kompensere overmetningen ved å dykke mot dypere vann siden trykket og løseligheten til gass i vann øker med trykk (10% reduksjon i TDG per 1 m dybde). Vannlag under 0,5 m dybde var lite påvirket av gassovermetning og under 1,13 m dybde var ikke vannet overmettet.

Studiene fra Vosso viser det kan forekomme en betydelig naturlig gassovermetning i flomsituasjoner i elver med strykpartier og dypt vann (mer enn ca. 5 m dybde også i trange strykpartier). Dette vil også kunne forekomme i liknende vassdrag (se kap. 2.1). At fiskene ikke utviklet tegn til gassblæresyke i Vosso kan forklares med tilstrekkelig og økt vanddyp i flomsituasjoner og innsjøer som gir mulighet for trykkkompensasjon. I lavvannsituasjoner var det knapt gassovermetning i Vosso.

Tabell 4. Gassmetning ved Vossovassdraget 2015-2017

River downstream hydroplant		Reference upstream hydropower plant	
 <p>Evanger hydroplant</p>	Min	98 %	 <p>Reference upstream</p>
	Max	113 %	
	Average	105,9 %	
	x5	101 %	
	x25	105 %	
	x50	106 %	
	x75	107 %	
	x95	109 %	
	n > 110 %	4	
	t > 110 %	1,2 %	
Min	99 %	 <p>Reference upstream</p>	
Max	112 %		
Average	103,8 %		
x5	100 %		
x25	102 %		
x50	104 %		
x75	106 %		
x95	108 %		
n > 110 %	2		
t > 110 %	0,2 %		

n >110 % = number of events larger 110 % TDG, t >110 % = percentage of time larger 110 % TDG

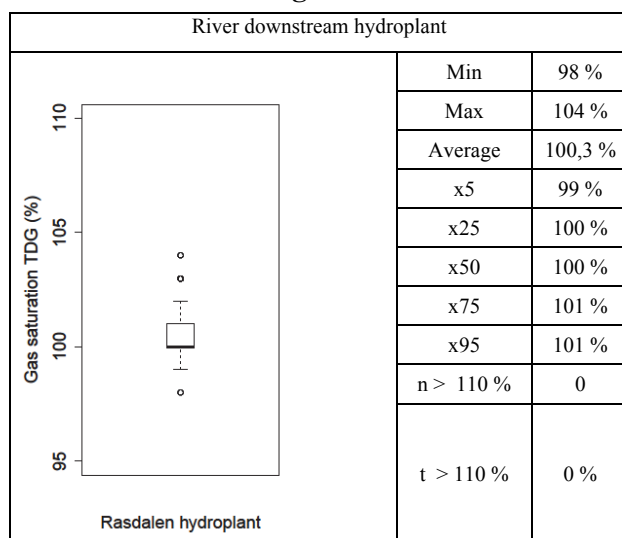
2.3.5 Rasdalen kraftverk i Rasdalselva

Gassmetning

Rasdalen kraftverk ligger i Voss kommune og har vært i drift siden 2009. Vanninntaket ligger i et oppdemmet elvemagasin i Rasdalselva, en sideelv til Bolstadelva (Vossovassdraget). Det er anadrom sjøaure og laks i nedre del av Rasdalselva. Brutto fallhøyde i kraftverket er 280 m og maksimum slukeevne er 2,2 m³ /s. Kraftverket har en Pelton turbin og 5,2 MW i maksimum (www.nve.no). TDG ble logget i utløpet til Rasdalen kraftverk i perioden fra 05.05 2014 til 14.04 2015.

Nedenfor kraftverket ble det registrert lave gassmetningsverdier med 100 % TDG i gjennomsnitt, 98 % TDG minimum og 104 % maksimum. TDG ble ikke målt ovenfor kraftverket, men gassmetningsnivået kan betraktes som naturlig basert på håndlogging. Testkjøring av omløpsventil førte ikke til gassovermetning. Pulg og Stranzl (2015) konkluderer med at kraftverket ikke har ført til økning i gassovermetning i Rasdalselva. Det regnes derfor ikke med biologiske effekter grunnet kunstig gassovermetning. Nærmere informasjon finnes i Pulg og Stranzl (2015).

Tabell 5. Gassmetning ved Rasdalen kraftverk 2014-2015



n >110 % = number of events larger 110 % TDG, t >110 % = percentage of time larger 110 % TDG

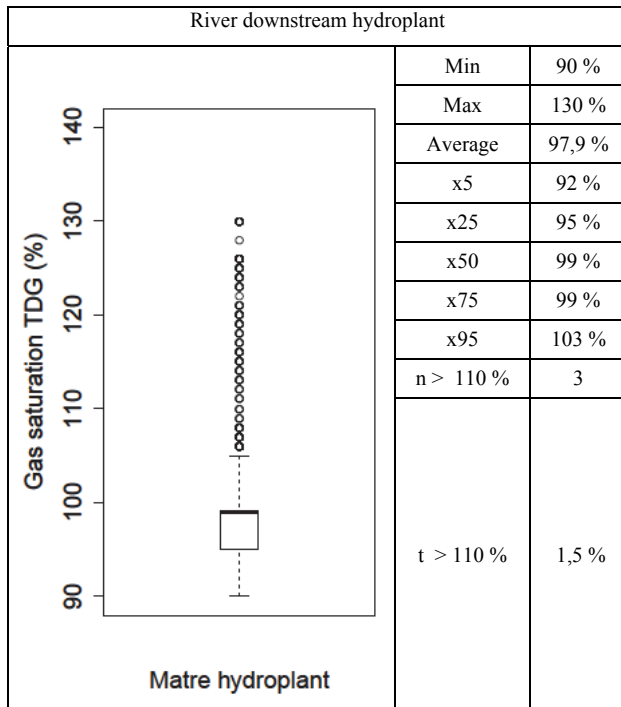
2.3.6 Hommelfoss kraftverk i Matreelva

Gassmetning

I Matreelva ble gassmetningen logget nedenfor Hommelfoss kraftverk i perioden fra 01.01 2011 til 31.12 2011. Kraftverket ble satt i drift i 1944 og rehabilitert i 1986. Brutto fallhøyde er 186,5 m og maks slukeevne er 1,8 m³/s gjennom en francisturbin. Dette gir maksimum ytelse på 2,8 MW (www.nve.no). Det ble oppdaget akutt fiskedød i 2009 i forbindelse med blakking av vann fra kraftstasjonen. En strekning på ca. 350 m nedenfor kraftverket var uten ungfisk. Gassovermetningen ble ansett å være en sannsynlig årsak til den observerte fiskedøden. Gassovermetning ble også diskutert som mulig forklaring for at det ble funnet påfallende få bunndyrarter og lave tettheter av bunndyr nedenfor kraftverket (Gabrielsen et al. 2011). I etterkant ble det satt i gang overvåking av TDG. Gjennomsnittlig gassmetning var rundt 98 % TDG,

minimum 90 % TDG og maksimum 130 % TDG i overvåkingsperioden. Verdier under 100 % forklares med lavere atmosfærisk trykk i magasinet som ligger 186 m høyere enn kraftverket. Vanligvis var det ikke gassovermetning fra kraftverket, men det forekom episoder med gassovermetning opptil 130 % om våren og om høsten. Episodene varte i noen dager. Samlet sett var det gassmetningsepisoder over 110 % TDG i 1,5 % av tiden fordelt på 3 bølger.

Tabell 6. **Gassmetning ved Hommelfoss kraftverk 2011**



n >110 % = number of events larger 110 % TDG, t >110 % = percentage of time larger 110 % TDG

Årsak

Tilstopping av en inntaksrist ble identifisert som årsak til luftinndrag, og spesielt når løv og isgang tettet inntaksristen om høsten og våren.

Biologiske effekter

Det er dokumenter fiskedød i elven og det ble funnet 25 døde aurer (Gabrielsen et al. 2011). Det er sannsynlig at fisk ble skadet og drept i perioder med høy gassovermetning i en strekning på minst 350 m. Gassmetningen ble redusert etter at det ble installert en automatisk ristrensker. Tettheten av ungfisk og eldre fisk økte også nedenfor kraftverket etter tiltaket (Fig. 5). Dette tyder på at gassovermetning bidro å tynne ut fiskebestanden og ungfiskproduksjonen i en strekning nedenfor kraftverket.

Tiltak

Høsten 2012 ble det installert en automatisk ristrensker av BKK. Inntil våren 2013 ble det ikke registrert gassmetningsverdier over 110 %. Varighetsovervåkingen ble dessverre ikke finansiert deretter og loggingen ble avsluttet. En trykkmåler ved inntaksristen skal varsle dersom tilstopping oppstår.

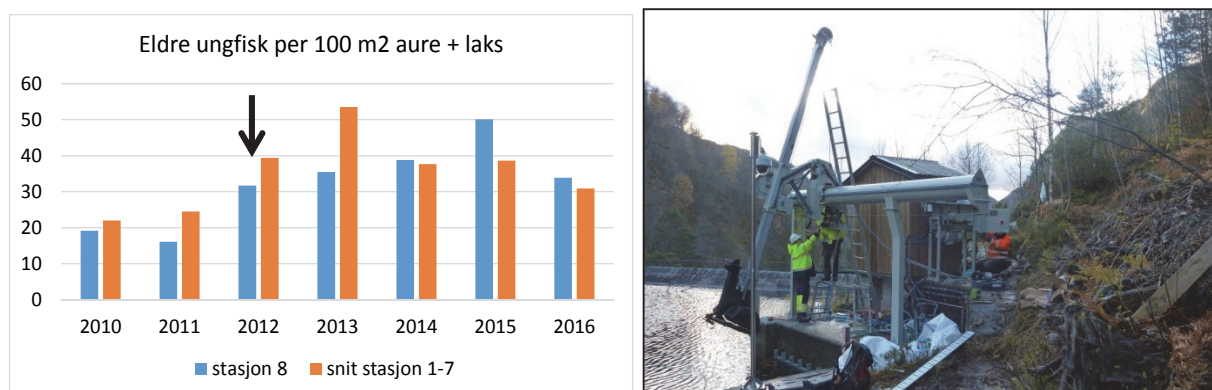


Fig. 5 Ungfisktetthet eldre ørret og laks i Matreelva 2010-2016 på st. 8 i påvirket strekning (350 m fra kraftutløp) og st. 1-7 lengre nedenfor. Før tiltak mot gassovermetning (2012) var gjennomsnittet av fisk på st. 8 lavere enn ellers i anadrom del av vassdraget (18 ind./100 m²). Etter at gassovermetningen var redusert (pil) økte tettheten på stasjon 8 signifikant (snitt 38 ind./100 m²). Til venstre vises ristrenskeren som nå hindrer inndrag av luft (Foto: BKK).

2.3.7 Hellandsfoss kraftverk i Modalselva

Gassmetning

Gassmetningen ble logget i Modalselva nedenfor Hellandsfoss kraftverk i perioden fra 14.03 2013 til 11.08 2017. Kraftverket er et småkraftverk som ble satt i drift 1992, og tilkoblet to nye bekkeinntak på et senere tidspunkt. Brutto fallhøyde er 72,2 m og maksimum slukeevne er 50 m³/s gjennom en francisturbin (www.nve.no), noe som gir maksimum 31,5 MW i maksimum ytelse. Overvåkingen ble satt i gang etter at det ble oppdaget påfallende lave fisketettheter nedenfor kraftstasjonen (Gabrielsen et al. 2011).

Det ble raskt oppdaget at det var lange perioder med 100-106 % TDG nedstrøms kraftverket avbrutt av perioder med gassovermetning mellom 115-125 % som typisk varte i noen dager og var knyttet til høy vannføring i bekkeinntak (Gabrielsen et al. 2011). Det ble også registret episoder med langt høyere gassovermetning opptil 168 % og 153 % TDG i ca 2 timer. Over hele loggingsperioden var gjennomsnittet 105,5 % TDG, maksimum 168 % TDG og minimum 99 % TDG. I 8,8 % av tiden var gassmetningen over 110 % TDG og med 166 episoder over 110 % TDG. Målingene ved munningen 4 km nedenfor viser at gassovermetningsbølgene ble transportert gjennom hele elven, men at de vanligvis ligger under 110 % ved elveutløpet. Ovenfor kraftverket ble det målt lavere TDG-verdier (100 % gjennomsnitt, 107 % maksimum og 99 % minimum).

Tabell 7. Gassmetning ved Hellandsfoss kraftverk 2013-2017

River downstream hydroplant		Reference upstream hydropower plant			
<p>Hellandsfossen hydroplant</p>	Min	99,3 %	<p>Reference upstream</p>	Min	99 %
	Max	168 %		Max	107 %
	Average	105,5 %		Average	100,3 %
	x5	102,3 %		x5	100 %
	x25	103,4 %		x25	100 %
	x50	104,5 %		x50	100 %
	x75	106,1 %		x75	100 %
	x95	113,5 %		x95	104 %
	n > 110 %	166		n > 110 %	0
	t > 110 %	8,8 %		t > 110 %	0 %

n >110 % = number of events larger 110 % TDG, t >110 % = percentage of time larger 110 % TDG

Årsak

I en analyse gjennomført med kraftverkseier ble bekkeinntakene utpekt som en viktig årsak til luftinndrag. Gassovermetning forekom under høy vannføring i bekkeinntakene, typisk i vårløsningen og under flommer. Dette kunne imidlertid ikke forklare all overmetning. Mer detaljerte analyser etter at bekkeinntakene var stengt (s.n.) viste at regulær lufting av francisturbinen ved lave driftsvannføringer førte til 112-117 % TDG (ved start eller stopp og 5-6 m³/s som ligger på nedre grense til dimensjonerende vannføring for turbinen). Dette var første gang man påviste at lufting av Francisturbiner kan føre til gassovermetning.

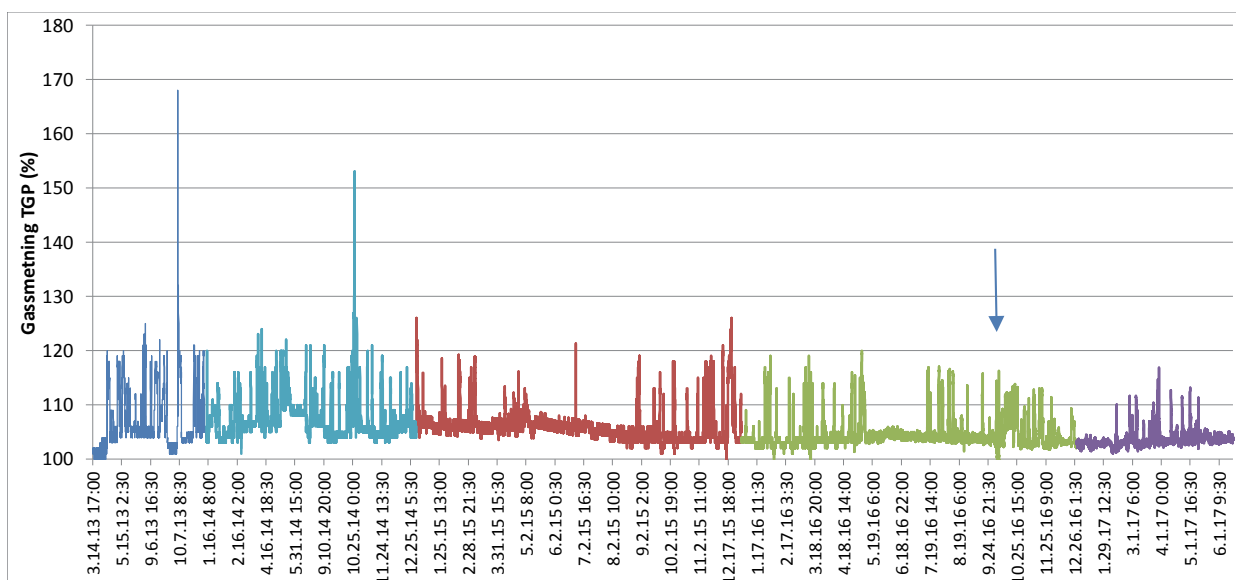


Fig. 6 Loggerdata fra gassovermetning i Modalselva 2013-2017 som viser to sjeldne, høye bølger og mange bølger mellom 110 og 130 %. Pilen merker tiden da bekkeinntak ble stengt.

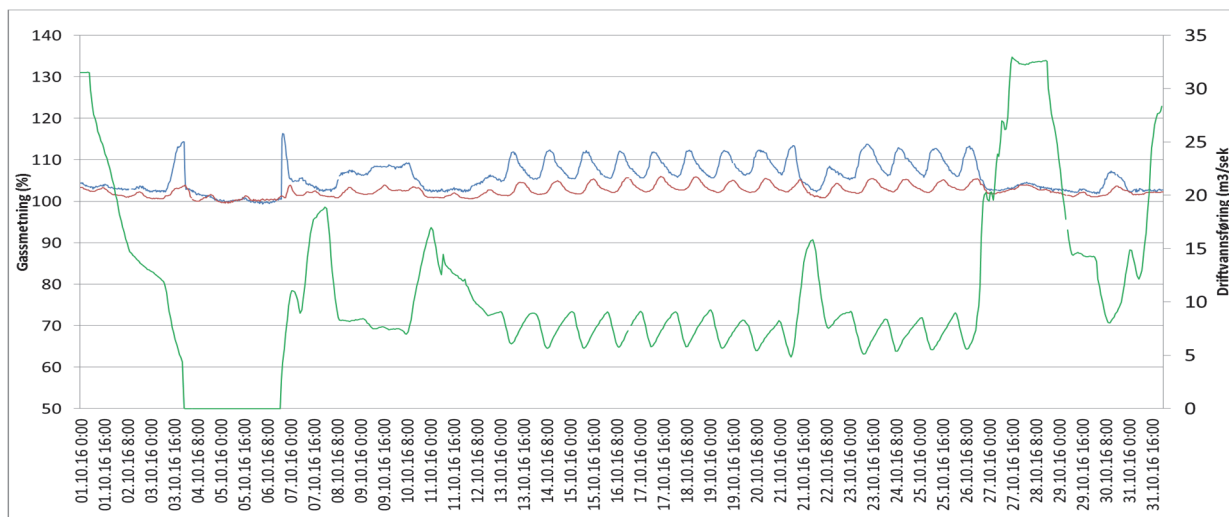


Fig. 7 Lufting av francisturbinen: Figuren viser kjøring av turbinen etter at bekkeinntak var stengt. Grønn linje viser driftsvannføring, blå linje viser gassmetning i kraftverksutløpet og rød linje viser gassmetningen i Modalesleva 4 km nedenfor (nær munning i sjø). Da turbinen ble startet eller stoppet, eller kjørt på nedre grense for dimensjonerende vannføring ved ca. 5-6 m³/s (lufting), ble det registret 112-117 % TDG.

Biologiske effekter

El-fiskestasjonen (st. 5) som ligger nærmest kraftutløpet (ca. 300 m) hadde lavere tettheter av ungfisk enn resten av elven, uten at det kunne forklares med fysiske habitatforhold. Ungfisktetthetene ble derfor overvåket videre (Fig. 8). Etter en gassmetningsbølge på 168 % i 2013 ble det ble registret betydelig lavere tettheter av fisk nedenfor kraftverket (Gabrielsen et al. 2012). Resultatene tyder på dødelighet av fisk grunnet gassovermetning. Vi kjenner ikke til direkte observasjoner av akutt fiskedød, men dette kan være vanskelig å observere i en relativ stor elv som Modalselva. Før kalking av Modalselva startet i 2016 var også forsuring en flaskehals for fiskeproduksjon i elven, men studiene viser at gassovermetning sannsynligvis har i tillegg bidratt negativt, særlig nær kraftverket.

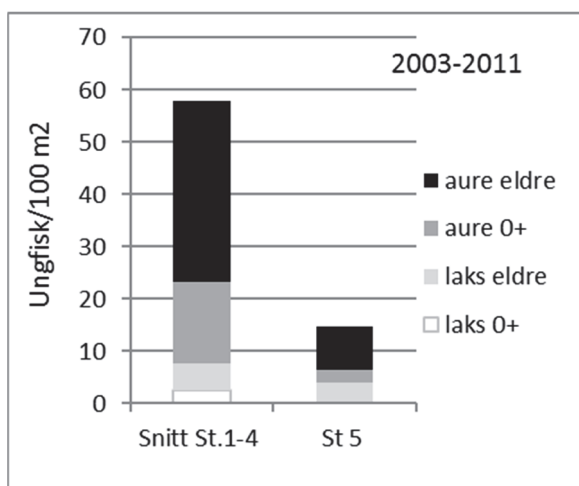


Fig. 8 Ungfisktettheter på st. 5 (300 m fra kraftutløp, gjennomsnitt 2003-2011) og nedenfor i Modalselva (gjennomsnitt, st. 1-4, 2003-2011).

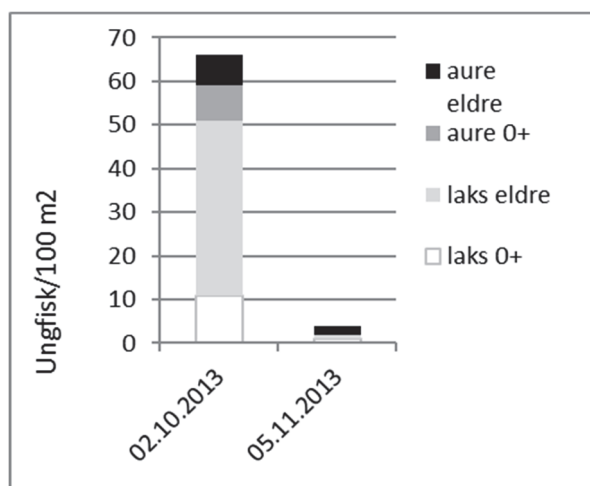


Fig. 9 El-fiskedata før- og etter gassovermetningsepisoden 5. oktober 2013 med 168% TDG (maksimum).

Tiltak

Sommeren 2016 ble bekkeinntakene stengt, noe som førte til en reduksjon i gassovermetning. Siden tiltaket er det ikke registrert bølger som overstiger 120 % TDG og tiden med verdier over 110 % TDG er redusert fra ca. 9 % til 0,7 %. BKK drøfter å forbedre kjøringen av bekkeinntakene med fjernstyrte luker, samt ombygging og justering av turbinkjøring. Det er planlagt videre overvåking og forsøk for å finne om fisken tåler disse nivåene.

2.3.8 Kvåle kraftverk i Dalsdalselvi

Gassmetning

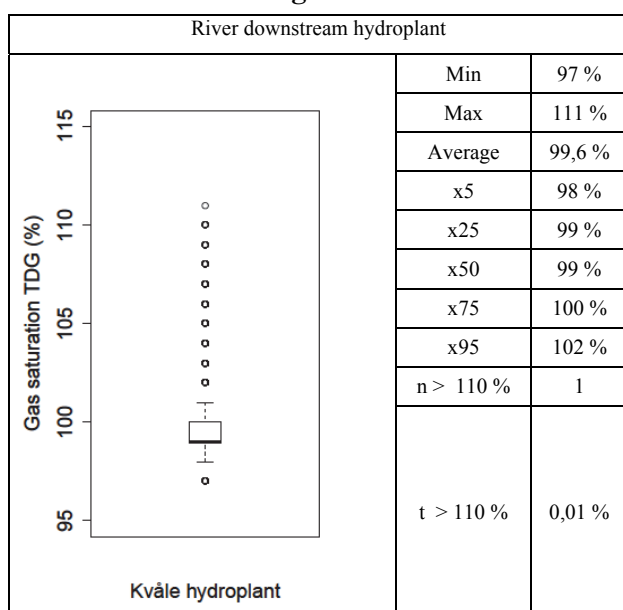
Kvåle kraftverk ligger i Dalsdalselvi i Luster kommune (Sogn og Fjordane) og har vært i drift siden 2009. Vanninntaket ligger i et oppdemmet elvemagasin og 112 m i brutto fallhøyde. Maksimum slukeevne er 5 m³/s gjennom to Francis turbiner, noe som gir 4,6 MW i maksimum ytelse. (www.atlas.nve.no). Gassmetning ble overvåket fra 01.05 2014 til 23. 04 2015.

Det ble funnet lav- til moderat gassovermetning nedenfor kraftverket. Gjennomsnitt var 100 % TDG, minimum 97 % og maksimum 111 %. Kjøring av omløpsventilen førte bare til små endringer (1-2 %) i TDG. Overmetningsepisoder falt ikke sammen med kraftverksdrift, men med perioder med flomvannføring og delvis driftsstans i kraftverket (Pulg og Stranzl 2015).

Årsak

Resultatene kan forklares med at gassovermetningen sannsynligvis oppsto naturlig i juvet ovenfor kraftverket. Ved høy vannføring i restfeltet oppsto gassovermetning, uavhengig av kraftverket. Gassovermetning under flommer kan forklares ved at luftbobler løses i vannet under hydrostatisk trykk på dypere vann nedstrøms fossene i det trange juvet (se kap. 2.1 og 2.3.4).

Tabell 8. Gassmetning ved Kvåle kraftverk 2014-2015



n >110 % = number of events larger 110 % TDG, t >110 % = percentage of time larger 110 % TDG

Biologiske effekter

Gassovermetningsepisodene var lave- til moderate og kortvarig. Det ble kun registrert en bølge med gassmetning over 110 % TDG og denne varte i 0,01 % av tiden. I 95 % av tiden var gassmetningen under 102 %. Overmetningen sammenfalt med flom og perioder med høy vannstand. Fisken hadde kompensasjonsmuligheter i vann under 1 m dybde. Det forventes derfor ikke negative effekter av gassovermetning for fisk.

2.3.9 Mel kraftverk i Vetlefjordselvi

Gassmetning

Mel kraftverk ligger i Vetlefjordselvi i Balestrand kommune (Sogn og Fjordane) og har vært i drift siden 1989. Brutto fallhøyde er 810 m og maksimum slukeevne er 7,5 m³/s gjennom en Pelton turbin, noe som gir 52 MV i maksimum ytelse (www.atlas.nve.no). Gassmetning ble overvåket fra 28.04 2014 til 22. 04 2015.

Det ble funnet lave til moderate verdier av gassovermetning nedenfor kraftverket. Gjennomsnittet var 104,5 % TDG, minimum 99 % TDG og maksimum 108 % TDG. Kraftverkdrift var korrelert med gassmetningen. Begrepet «Sturopeaking» ble introdusert for de karakteristiske bølgene av gassovermetning som oppsto under effektkjøring (Pulg, Vollset, et al. 2016). Gassovermetningen ble redusert med en tredel i en terskel ved utløpet av elven og var under 103 % etter 500 m nedstrøms kraftverket. Gjennomsnittsverdien i restfeltet var 101 % TDG og med minimum 99 % TDG og maksimum 105 % TDG %, der maksimumsverdien oppsto under flomsituasjoner.

Årsak

Peltonturbinen i kraftverket lufter vann godt og det var ingen sesongmessige variasjoner. Det er derfor sannsynlig at overmetningen oppstår i det kompakte kraftverkutløpet der luftbobler etter turbinpassasjen kan blandes inn under hydrostatisk trykk (Pulg et al. 2016).

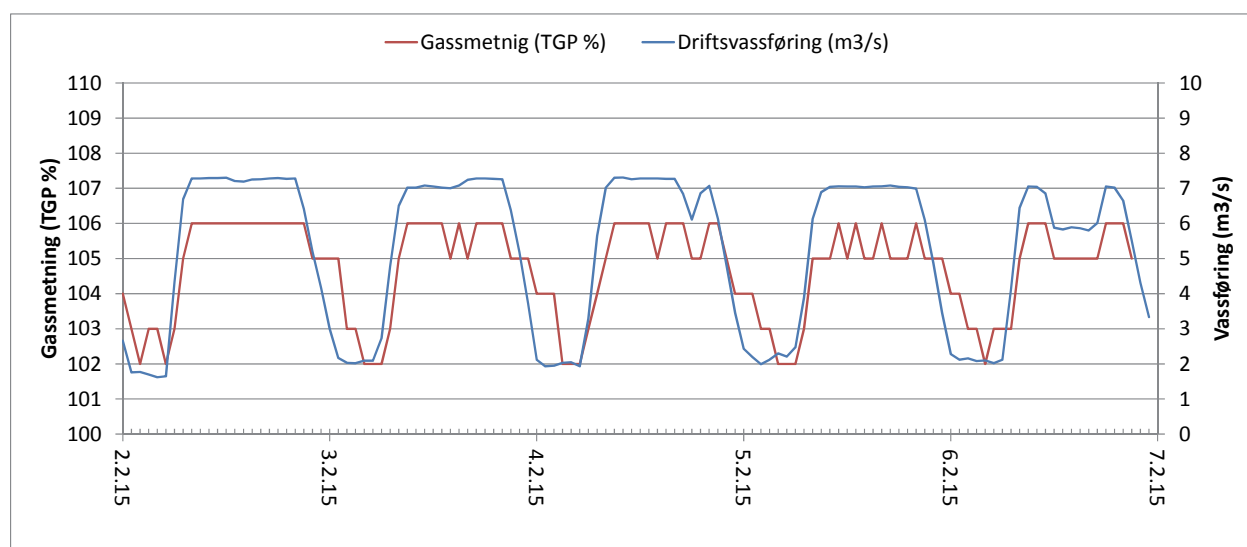


Fig. 10 Saturopeaking i Vetlefjordselva: Gassmetning (TDG) i prosent og driftsvannføring (m³/s) i kraftverksutløpet på Mel fra 2.2 2015 til 7.2 2015.

Biologiske effekter

Gassmetningsverdiene og berørt område er i elven er så lave at risiko for utvikling av gassblæresyke hos fisk antas å være liten, selv om økt stress under effektkjøring i kombinasjon med gassmetningsendringer ikke kan utelukkes.

Tabell 9. Gassmetning ved Vetelefjordelvi ved Mel kraftverk 2014-2015

River downstream hydroplant		Reference upstream hydropower plant			
<p>Mel hydroplant</p>	Min	99 %	<p>Reference upstream</p>	Min	99 %
	Max	108 %		Max	105 %
	Average	104,5 %		Average	101,3 %
	x5	101 %		x5	100 %
	x25	103 %		x25	101 %
	x50	105 %		x50	101 %
	x75	106 %		x75	102 %
	x95	107 %		x95	102 %
	n > 110 %	0		n > 110 %	0
	t > 110 %	0 %		t > 110 %	0 %

n >110 % = number of events larger 110 % TDG, t >110 % = percentage of time larger 110 % TDG

2.3.10 Myster kraftverk i Ekso

Den 12. mai 2018 ble det ved en tilfeldighet observert gassovermetning med fiskedød på grunn av akutt gassblæresyke i elven Ekso (Hordaland). Gassovermettet vann kom fra kraftverk Myster. Det var ikke en varighetsovervåking før dette og eksempelet illustrerer at korte, uventete og alvorlige gassovermetningsbølger kan forekomme i denne type vannkraftverk (1 francisturbin, 248,8 m fallhøyde, maks. slukeevne 50 m³/s, 107 MW, magasin- og bekkeinntak, oppstart 1987). Årsak var mest sannsynlig tilstopping av inntaksrist (dykket inntak i magasin) med vannplanter og inndrag av luft under vårflommen (BKK). Gassmetning fra kraftverket ble først overvåket etter denne episoden (fra 18.05. 2018) og derfor er det enda ikke nok data for å presentere årsoversikter som i de andre vassdragene. Isteden presenteres gassmetningen siden oppstart av overvåkingen i figur nedenfor. Gassovermetningen ble oppdaget ved at en av våre fiskebiologer var i området på det gjeldende tidspunkt og registrerte at vannet i Ekso var blakket (Fig. 12). Han visste at dette var en indikator for gassovermetning. Kraftselskapet BKK ble varslet. BKK hadde også selv oppdaget trykkfall i trykksjakten til Myster kraftverk og var i ferd med å redusere driftsvannføring. Elven hadde høy vannføring grunnet vårflom. Høy vannføring og blakket vann gjorde at det ikke var lett å observere fisker i elven, men ved hjelp av undersøkelser som vi iverksatte samme dag (bl.a. snorkling) ble det funnet 45 døde ungfisk av laks og aure, samt svimet fisk. Måker og silender plukket også fisk i elven. Innsamlet fisk hadde tydelige tegn på gassblæresyke med synlige bobler i finnene (Fig. 13-Fig. 14). Episoden følges opp videre med kvantitativt el-fiske og kvantitative bunndyrundersøkelser for å fastslå biologiske effekter.

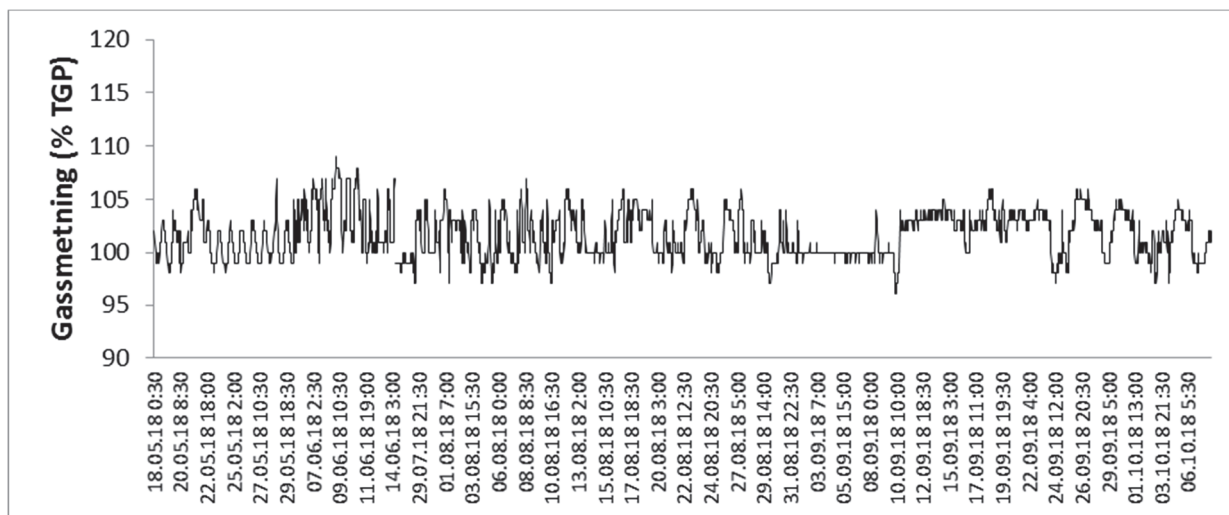


Fig. 11 Gassovermetning i utløp Myster kraftverk i Ekso i periden 18. mai til 06.10. 2018.

I følge BKK var årsak til overmetningsepisoden en tilstoppet varegrind i inntaksmagasin. Vannplanter som ble revet med under vårflokken hadde tettet risten og ristrensere klarte ikke å fjerne plantene. BKK anslår at episoden varte mellom en til seks timer. Basert på vår erfaring med logging når vann er blakket av små gassbobler, er det sannsynlig at gassmetningen var større enn 140 % TDG.

Som tiltak ble det satt i gang forbedringer i ristrensere, samt et alarmsystem basert på trykkmåling ved inntaksristen og gassmetningsmåling ved utløpet. Skjer noe lignende igjen kan kraftverksdriften reduseres tidligere og med dette kan gassovermetning reduseres betydelig i omfang og dose. I perioden etterpå (mai til oktober 2018) var median metning 101 %, maksimal 109 %. De relativt lave overmetningsperioder ser ut til å henge sammen med driftsmønsteret i kraftverket (Saturpeaking) og den type overmetning kan oppstå i kraftverksutløpet (se kap. 2.3.9). Overvåking av gassmetning og oppfølging av biologiske effekter pågår.



Fig. 12 Elven Ekso med blakket vann under en gassovermetningsepisode 12.05 2018 (Foto: Eirik S. Normann)



Fig. 13 Død ungfisk av laks funnet rett etter gassovermetningsepisoden i Ekso (Foto: Tore Wiers)



Fig. 14 Fisken hadde tydelige tegn på gassblæresyke, her vist med bobler i brystfinne. (Foto: Tore Wiers)

2.4 Gassovermetning i andre elver i Norge

I dette kapitlet presenteres eksempler på tilfeller med kunstig gassovermetning i norske vassdrag som er publisert og ikke inkludert i Uni Research Miljø (LFI) sin varighetsovervåking.

2.4.1 Gassovermetning i Skibotneleva (Troms)

Under gytefisketelling 2005 ble det oppdaget akutt fiskedød av både ungfisk og gytefisk av laks, sjøaure og sjørøye i Skibotnelva. Fiskene viste typiske tegn på gassblæresyke. Senere ble det satt i gang overvåking og det ble registret lengre perioder mellom 115 og 130 % totalgassmetning og over 170 % i korte perioder nedenfor kraftverksutløpet (Kanstad-Hansen (2012); det skrives «nitrogenmetning» i figuren med 170 % men etter samtale med forfatteren dreier det seg mest sannsynlig om totalgassmetning). Luftinndrag i bekkeinntak ble identifisert som kilde for gassovermetning. I følge Troms Kraft (Øyvind Steffenach, pers. med.) ble det vurdert forskjellige muligheter til avbøtende tiltak, deriblant lufting av vann med kompressor. Testkjøringer viste imidlertid lite forskjell i gassmetning, trolig fordi vannmengde var for sto i forhold til injisert luft. (Kraftverksdata (NVE): Satt i drift 1979, brutto fallhøyde 440 m, maks slukeevne 18,5 m³/s, maksimal ytelse 70 MW, en francisturbin, bekkinntak.

2.4.2 Gassovermetning i Nidelva (Agder)

I Nidelva ble det observert perioder med blakking av vann nedenfor Rygene kraftverk fra 1978. Det har blitt målt gassovermetning opptil 200 % i korte perioder. Årsak er en omløpstunell (ikke turbinpassasje) som kan rive med seg luft når den er i drift. Det ble observert akutt gassblæresyke samt fiskedød i elva og i forsøksbur (Thorstad et al. 1997; Heggberget 1984; Blindheim et al. 1984). Kraftverksdata (NVE): Satt i drift 1978, brutto fallhøyde 38 m, maksimal slukeevne 169,8 m³/s, maksimal ytelse 55 MW, en kaplanturbin.

2.4.3 Gassovermetning i Driva (Møre og Romsdal)

I utløp fra Driva kraftverk ble det registrert totalgassmetninger opptil 205 %. Det ble i perioder observert fiskedød pga. gassblæresyke. Overmetningen ved 160 % rammet en elvestrekning på 3 km i en relativ bratt elvestrekning med mange store blokker. Årsak til overmetning var luftinndrag i bekkeinntak (Blindheim et al. 1984). Kraftverksdata (NVE): Satt i drift 1973, brutto fallhøyde 565,6 m, maksimal slukeevne 30 m³/s, maksimal ytelse 140 MW, to francisturbin, bekkeinntak.

2.4.4 Gassovermetning i Tafjord (Møre og Romsdal)

Tafjord kraftverk munner i Tafjorden og det ble registrert fisk med gassblæresyke og økt fiskedød i et oppdrettsanlegg i fjorden utenfor kraftutløpet. Gassblæresyke tilskrives gassovermetning fra kraftverket og det ble registrert opptil 140 % N₂ metning i kraftutløpet. Hele indre fjordbassenget kunne i perioder være rammet av overmettet vann. Årsak til gassovermetning var luftinndrag i bekkeinntak (Blindheim et al. 1984). Kraftverksdata (NVE): Satt i drift 1968, brutto fallhøyde 430 m, maksimal slukeevne 30 m³/s, maksimal ytelse 110 MW, to francisturbin, bekkeinntak.

2.4.5 Gassovermetning i Masfjorden (Hordaland)

Ved utløp av Matre kraftverk i Masfjorden har det blitt observert blakking av vann og fiskedød i merder i sjø grunnet overmettet vann fra kraftverk som førte til gassblæresyke (Blindheim et al. 1984).

2.4.6 Gassovermetning i Førsvatnet, Kjelavassdraget (Telemark)

En tunell med overflateinntak mellom Vesle Kjela kraftverk og Førsvatn førte til gassovermetning i Førsvatnet i 1980- og 90-tallet. Det ble observert dødelighet hos ørret og plankton og delvis lang transport av overmettet vann gjennom Kjela kraftverk og vassdragsdeler helt til Totak (OED 2004, Meddelte vassdragskonsesjoner, www.statsbudsjettet.no/Upload/Statsbudsjett_2006/dokumenter/pdf/vedlegg/vassdrag.pdf). Det ble bygget vakuuminntak for inntaket i Vesle Kjela for å hindre gassovermetning. Det har fungert bra, men det har vært kraftig belastning på installasjonen og mye vedlikehold. Bygging av nytt Vesle Kjela kraftverk i 2019-20 vil fjerne problematikken og behovet for vakuumluker (Statkraft, Jostein Kristiansen, pers. med.).

3 Biologiske effekter av gassovermetning

3.1 Gassblæresyke hos fisk

Kliniske tegn som tyder på gassblæresyke hos fisk ble først beskrevet allerede på 1600-tallet (Harvey 1975). Henry (1803) beskrev sammenhengen og proporsjonaliteten mellom økt løsløstet av gasser i vann og trykk («Henrys lov»). Begrepet ‘gassovermetning’ («Uebersaettigung») ble introdusert i et limnologisk arbeid om

løste gasser i Bodensee (Harvey 1975; Hoppe-Seyler 1896). Selve årsaken til gassblæresyke ble identifisert rundt 1900 og publisert som «Gas disease» (Marsh and Gorham 1905). Gassblæresyke (gas bubble disease; GBD, syn. Gas bubble trauma) har siden blitt beskrevet fra en rekke ulike akvatiske organismer, men er særlig kjent fra fisk i ferskvann (Weitkamp and Katz 1980). Sykdommen kan føre til dannelse av gassbobler i vev og blodkapillærer som igjen kan føre til blodpropp og blokkering av nerver med alvorlige konsekvenser. Kliniske tegn på gassblære syke hos fisk kan være endret adferd, gassbobler i ytre- og indre organ og økt dødelighet (Bouck 1980; Weitkamp and Katz 1980). Fisk som utsettes for langvarig eksponering med lave nivåer av gassovermetning kan utvikle subletale eller kroniske tilstander av sykdommen og vil være utsatt for sekundære effekter som økt stressnivå, økt mottakelighet for infeksjonssykdommer eller økt predasjonsfare (Crew, Keatley, and Phelps 2017; Geist et al. 2013). Fisk med gassblæresyke kan imidlertid bli frisk og symptomfri dersom gassovermetningen opphører raskt nok og ikke var for høy (Rossland 1999), men fisk som har overlevd gassblæresyke vil ha lavere toleranse for gassovermetning senere (Wang et al. 2015). Studier har også vist at sykdommen kan reverseres til en viss grad dersom fiskene holdes på dypere vann (Antcliffe, Fidler, and Birtwell 2002b; Weitkamp and Katz 1980). Denne effekten forklares med kompensasjonsdyp og blir nærmere omtalt i kapittel 3.4. Flere forfattere rapporterer en økt samlet dødelighet av mange individer etter en viss eksponering, deretter dapper dødeligheten av, skjer mer gradvis og enkelte individer kan overleve relativt lenge (Bouck et al. 1976; Krise 1993).

3.2 Hva er kritiske nivåer av gassovermetning hos laks?

En rekke eksperimentelle forsøk av ulike laksearter (stillehavslaks, *Oncorhynchus* spp.) gjennomført i Nord-Amerika viser at GBD og dødelighet kan forekomme ved TDG (total dissolved gases) nivåer ned mot 106 % og at størst økning i dødelighet vanligvis forekommer ved TDG > 112 % på juvenile stadier (Weitkamp & Katz, 1980). Anbefalte grenseverdier for TDG i regulerte vassdrag i Nord Amerika ligger ofte på rundt 110 %-115 %, i Canada mellom 103 % og 110 % (Environment. 1999). Disse studiene av Nord- Amerikansk laks viser imidlertid at det er stor forskjell mellom arter og stadier mht. utvikling av GBD og overlevelse ved ulike TDG-nivåer i vann og eksponeringstider. Det er derfor rimelig å anta at lignende forskjeller forekommer blant atlantisk laksefisk, dvs hos ørret (*Salmo trutta*) og Atlantisk laks (*Salmo salar*). Toleranse for gassovermetning og utvikling av GBD hos atlantisk laksefisk er imidlertid ikke undersøkt eller tilstrekkelig dokumentert. Følgelig finnes det heller ingen grenseverdier for gassmetning som er tilpasset atlantisk laksefisk i norske vassdrag. I denne forbindelse har Uni Research i samarbeid med ILAB gjennomført et eksperimentelt forsøk med lakseparr. Hovedmålet med forsøket var å undersøke hva slags effekt ulike nivåer av gassovermetning hadde på lakseparr (*Salmo salar*) over tid. Spørsmål vi søkte svar på var: **a)** Vil økt gassovermetning medføre en adferdsendring hos fisken med tanke på svømmeadferd og andre stressresponser? **b)** Er gassovermetning en målbar stressfaktor for fisken? **c)** Hvilke kliniske tegn på GBD kan oppstå ved ulik konsentrasjon og eksponeringstid, og **d)** hva er dødelig TDG-dose og eksponeringstid for lakseparr?

FORSØKSOPPSETT

Det ble satt opp et eksperimentelt karforsøk der det ble brukt lakseparr (snittvekt 43 g, snittlengde 15,6 cm) for å dokumentere effekter av ulike gasskonsentrasjoner og eksponeringstid. Forsøksfisken ble eksponert for ulike TDG- konsentrasjoner (100 %, 105 %, 110 %, 115 % og 120 %) over en periode på maksimum 12 dager. Totalt var det 15 kar (tre parallelle kar for hver TDG- konsentrasjonen) i forsøket med 20 fisk i hvert

kar (Figur 15). I tillegg ble det gjennomført et før-forsøk med 5 fisk i ett kar med 130 % TDG for å teste effekten av antatt kritisk gassovermetning. TDG- nivåene ble logget hvert 30. minutt gjennom hele forsøksperioden. I tillegg ble det jevnlig gjennomført manuelle kontrollmålinger i tankene. Forsøket ble gjennomført i 6 °C ferskvann med 12:12 timers lysintervall og daglig røktning av fiskene. Karstørrelsene var 1 x 1 m og med 30 cm vannstand. Denne lave vannstanden var planlagt for å unngå kompensasjonsdyp under gassovermetningsforsøket. Vi gjorde 4 uttak av fisk (5 fisk per kar) fordelt utover forsøksperioden for GBD-diagnostikk. I tillegg ble adferden til fiskene i ulike kar observert og filmet. I tilfeller der fiskegrupper opplevde tegn på gassblæresyke i form av alvorlige atferdsendringer (svimlere) med økende dødelighet hos mer enn halvparten av fiskene i gruppen ble karet avsluttet (LC50, dødelig nivå). Karforsøket med gassovermetning

Gruppe	T100 (1-3)	T105 (1-3)	T110 (1-3)	T115 (1-3)	T120 (1-3)	T130 (1)
TDG	100 %	105 %	110 %	115 %	120 %	120 %
	n=20	n=20	n=20	n=20	n=20	n=5
	n=20	n=20	n=20	n=20	n=20	
	n=20	n=20	n=20	n=20	n=20	
Totalt antall (n)	60	60	60	60	60	5

Fig. 15 Forsøksoppsett. Triplikate grupper (1-3) med fisk (lakseparr, snittvekt 43 g) i kar med ulike nivåer av TDG (total dissolved gas). Totalt 305 lakseparr ble brukt i forsøket.

(inkludert før-testing og stabilisering av gassnivåer) på lakseparr ble gjennomført i perioden 17. november – 4. desember 2017. Kliniske symptomer på GBD kan bli diffuse *post mortem* hos selvdød fisk. For å unngå feildiagnostikk ble derfor kun levende fisk undersøkt. Alle fiskene i uttakene (maks 5 fisk per uttak) ble avlivet med en overdose metacain (Finquel vet) og undersøkt umiddelbart. Fiskenes vekt og lengde ble notert. Kliniske tegn for GBD ble undersøkt i a) gjelle, b) hud og finner, c) øye, d) munnhule og e) indre organer (blødninger, vevsforandringer). I tillegg ble det tatt blodprøver for hematocrit- målinger (Hct) av alle fiskene. Hct- målinger viser relativ andel røde blodceller i en blodprøve. Forhøyede Hct- verdier kan indikere en effekt av stress som gir svelling av erythrocytter pga frigjøring av stress som frigjør stresshormoner (katekolaminer) og frigjøring av erythrocytter fra milt. Fiskens adferd ble observert minimum 1 gang daglig i alle forsøkskar i forbindelse med prøveuttakene, og det ble i tillegg gjort observasjoner i periodene mellom prøveuttakene. Ventilasjonsrate, svømmemønster og fordeling i karet ble notert, i tillegg til annen adferd slik som panikk, apati, hyperaktivitet, aggressivitet, kramper, stanging, unormal oppdrift, forstyrret balanse og raping (luftbobler fra munn eller gjellelokkåpning).

RESULTATER

Antall undersøkte fisk og observerte kliniske tegn på gassblæresyke er oppsummert i Tabell 3.2.1.

Kontrollmålinger av TDG viste forhøyede nivåer (117-118 %) i den ene tanken i gruppe T115 kort tid etter at fiskene ble overført til karene i denne gruppen. Kontrollmålinger viste ingen betydelig forskjell mellom tanker i de andre gruppene. Registreringer av TDG nivåene viste imidlertid en synkende tendens gjennom forsøksperioden i gruppe T105 og T110 (Figur 16).

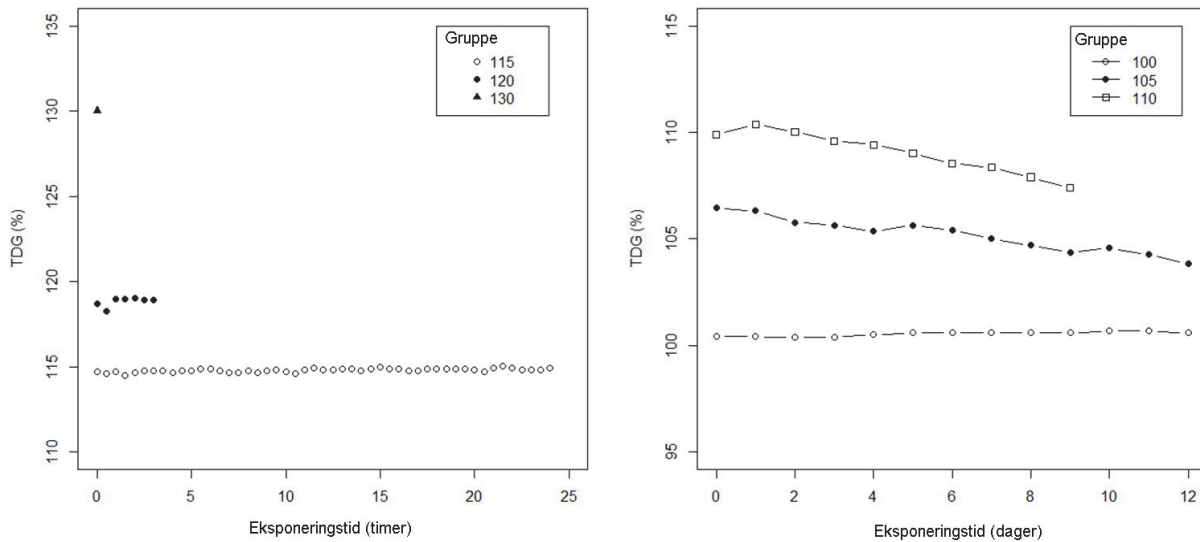


Fig. 16 Registrerte TDG nivåer (%) i vannet til de ulike gruppene gjennom forsøksperioden. Kontrollmålinger etter 7 timers eksponering viste forhøyede nivåer (117-118%) i den ene tanken i gruppe 115 (ikke vist i figuren).

Resultatene viste akutt gassblæresyke og dødelighet i karene med TDG- konsentrasjoner over 110 %. Typiske kliniske tegn på gassblæresyke i disse gruppene var gassemboli (gassbobler) i gjellekapillærer og indre blødninger som skyldes sprenge blodkar og kapillærer (Figur 17-19). I tillegg ble det observert gassbobler i finner hos nesten alle fiskene (Figur 20).

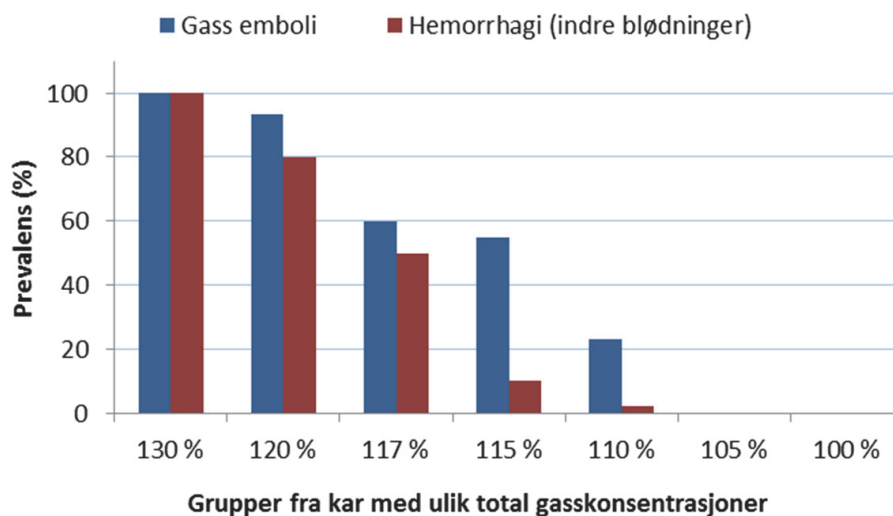


Fig. 17 Andel observerte kliniske tegn på gassblæresyke hos lakseparr: Gassemboli (blodpropp i gjellene) og hemorragi (indre blødninger).

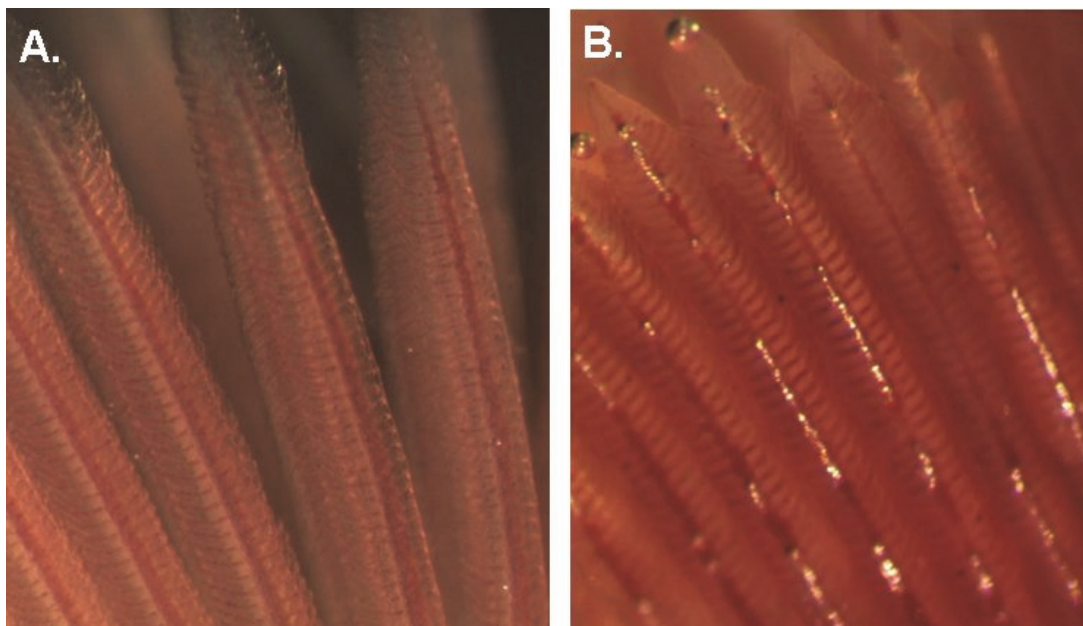


Fig. 18 Gassemboli i gjeller. A. Normale gjeller, B. Emboli (gassbobler i kapillærene). Typisk for akutt gassblæresyke fisk i forsøket (Foto: Trond Einar Isaksen).

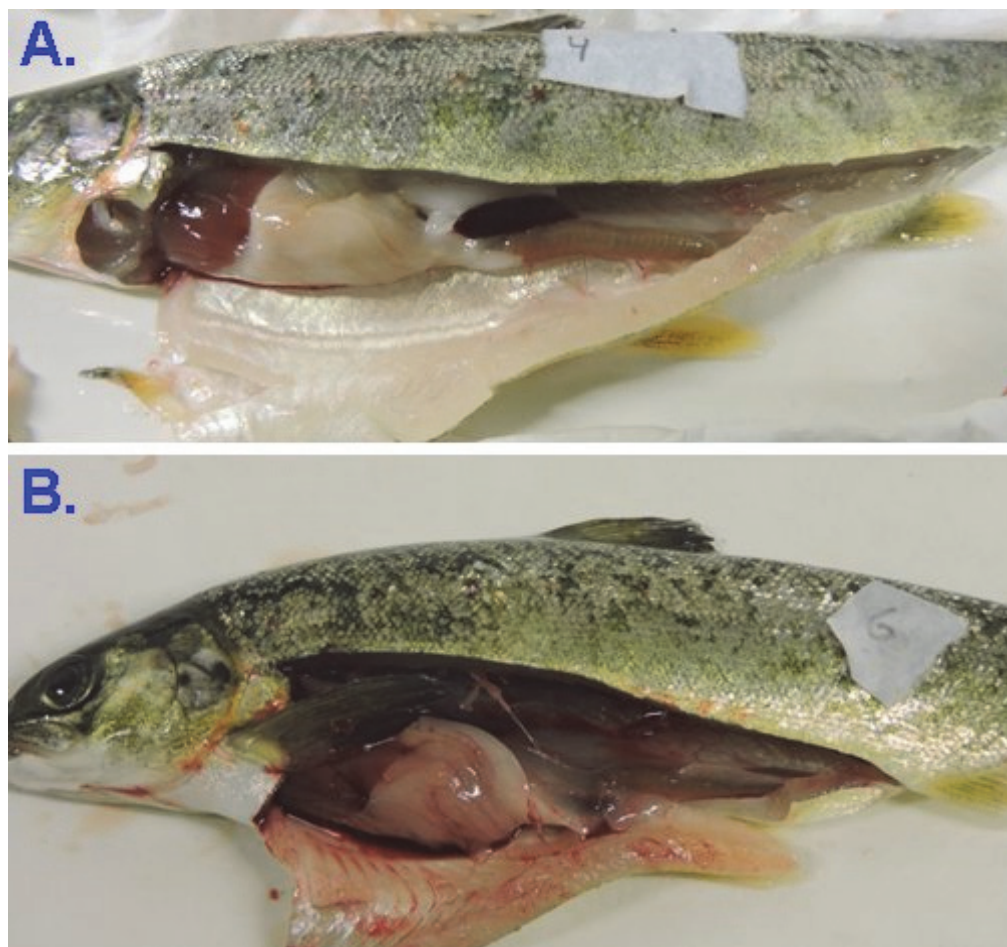


Fig. 19 Hemorragi. A. Normal, frisk fisk, B. Indre blødninger, blodig ascites som skyldes sprukne blodkar / kapillærer. Typisk for akutt gassblæresyke fisk i forsøket (Foto: Trond Einar Isaksen).

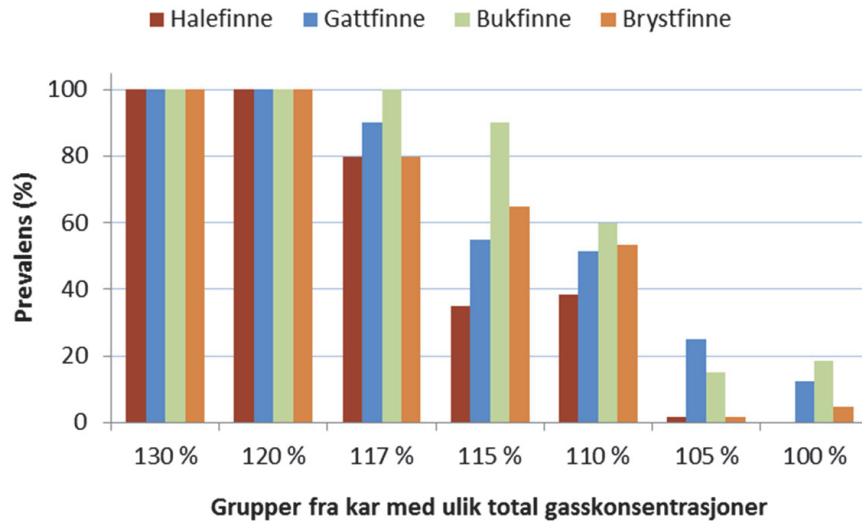


Fig. 20 Andel observerte kliniske tegn på gassblæresyke hos lakseparr: Gassbobler i finner.

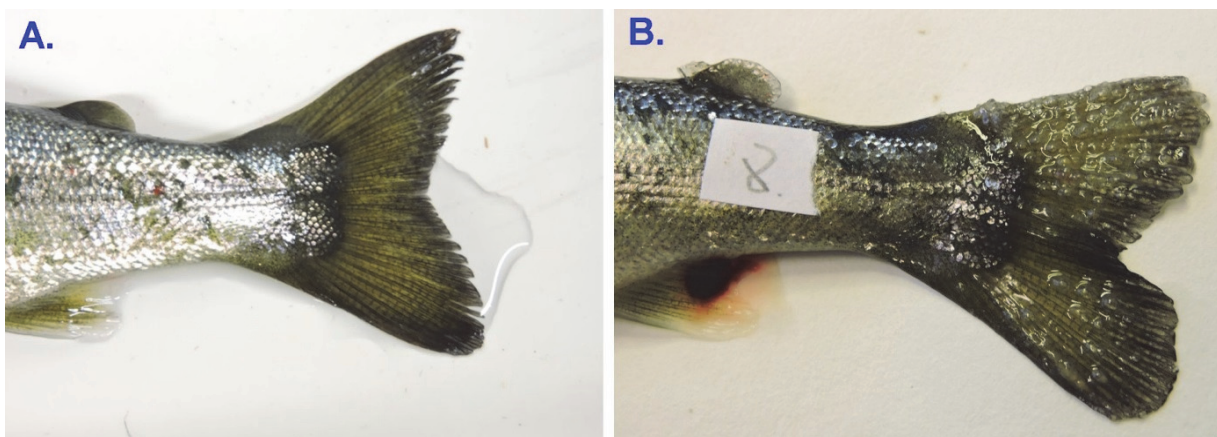


Fig. 21 Gassblæresyke. A. Normale finner, B. Gassbobler i fettfinne og halefinne. Gassbobler ble observert hos fisk med både akutt- og subakutt gassblæresyke (Foto: Trond Einar Isaksen).

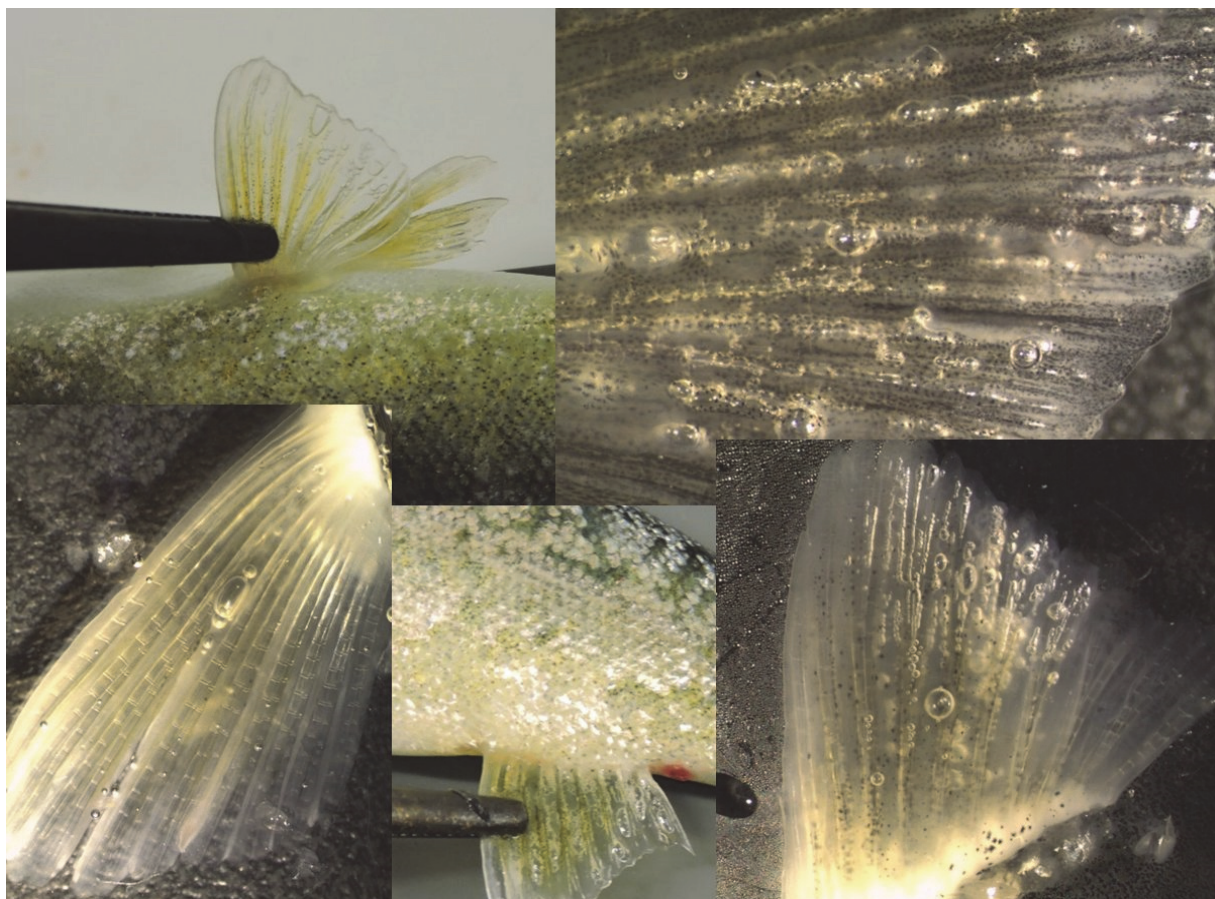


Fig. 22 Gassblæresyke. Typiske gassbobler i ulike finner hos eksponert fisk i det gjennomførte forsøket. Gassbobler ble observert hos fisk med både akutt og subakutt gassblæresyke (Foto: Trond Einar Isaksen, Einar Bye-Ingebrigtsen).

Adferden til fiskene i grupper med akutt GBD varierte fra panisk til apatisk. Det ble observert fisk med kramper og forstyrret balanse. Raping var relativt vanlig. Det ble registrert en betydelig høyere ventilasjonsrate hos fisk med akutt GBD enn de andre gruppene (Figur 23). Dette kan indikere stress eller panisk respons. Det ble registrert noe forhøyet Hct hos fisk med lang eksponeringstid og subakutt GBD (T110) sammenlignet med de andre gruppene (Figur 24). Lave Hct- verdier nivåer kan være tegn på anemi eller blodfortynning (osmoregulatoriske problemer). De laveste Hct verdiene ble registrert hos fisk med akutt GBD og samsvarer med observerte indreblødninger (Figur 24).

Til tross for at TDG-nivået sank i gruppe T110 ble det registrert en betydelig økning i bobledannelse i finnene (Figur 20) og økt antall tilfeller med gassemboli i gjeller (subakutt GBD). I tillegg ble det observert andre kliniske tegn på gassblæresyke etter flere dagers eksponeringstid, som hemorragi (indre blødninger), eksoftalmi (utstående øyner pga trykk) og gassbobledannelse på gjellelokk og i munnregionen (Figur 26-28). Det ble ikke registrert økt dødelighet hos fisk i gruppe T110 (kun en død fisk), men på grunn av utviklingen og alvorlighetsgraden til gassblæresyke hos fisk i denne gruppen, ble fiskene avlivet etter 9 dager.

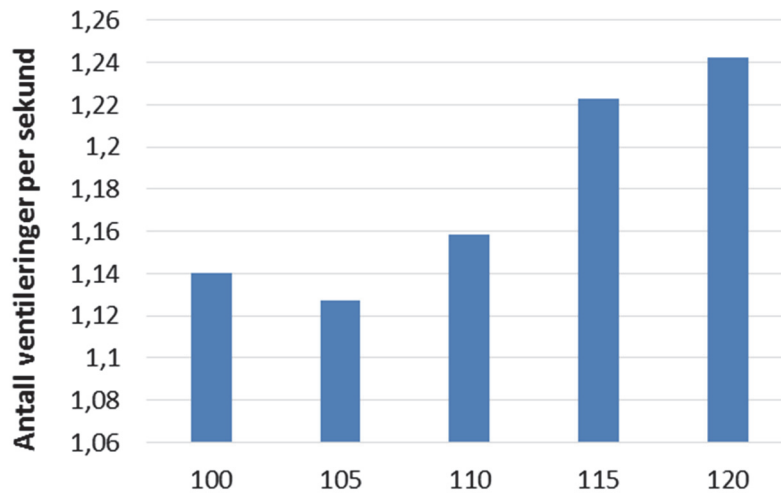


Fig. 23 Ventilasjonsrate. Gjennomsnittlig ventilasjonsrate (antall ventileringer per sekund) hos fisk i grupper med ulike TDG nivåer.

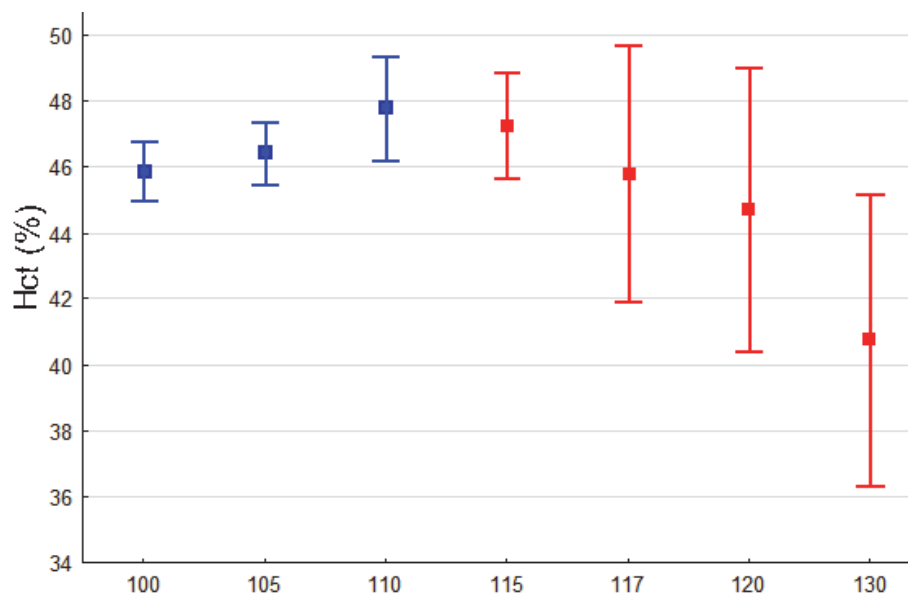


Fig. 24 Gjennomsnittlige hematocrit (Hct) verdier (± 0.95 CI) i grupper med ulike TDG nivåer (100-130%). Blå viser grupper med lang eksponeringstid (dager), røde viser grupper med kort eksponeringstid (timer).

I gruppene T100 og T105 ble det kun observert få, små gassbobler i enkelte fisk (Figur 25). Slike gassbobler kan være typiske symptomer for subletale stadier av GBD. Det ble registrert perioder med noe forhøyede TDG nivåer i kontrollgruppen (T100) som kan forklare symptomer på GBD hos kontrollfisk i dette forsøket. Ingen anormal adferd ble registrert i disse gruppene med TDG < 110 %, men noen få tilfeller med raping ble observert.

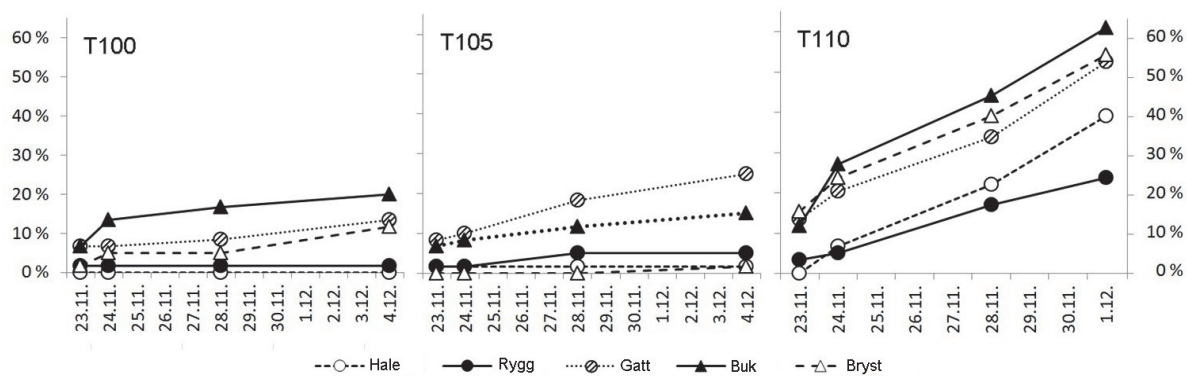


Fig. 25 Utvikling av gassblæresyke hos lakseparr eksponert for ulike TDG nivåer over flere dager. Relativ kumulativ frekvens av gassboble dannelse i finner hos fisk i gruppe T100 (TDG 99,9 % \pm 0,8), T105 (103,5 % \pm 0,9) og T110 (109,7 % \pm 1,3).



Fig. 26 Gassblæresyke. Gassbobler på gjellelokk (operculum) og i munnvik. Kun observert hos fisk med subakutt gassblæresyke (Foto: Einar Bye-Ingebrigtsen).



Fig. 27 Gassblæresyke. Gassbobler i munnhule. Kun observert hos fisk med subakutt gassblæresyke (Foto: Einar Bye-Ingebrigtsen).

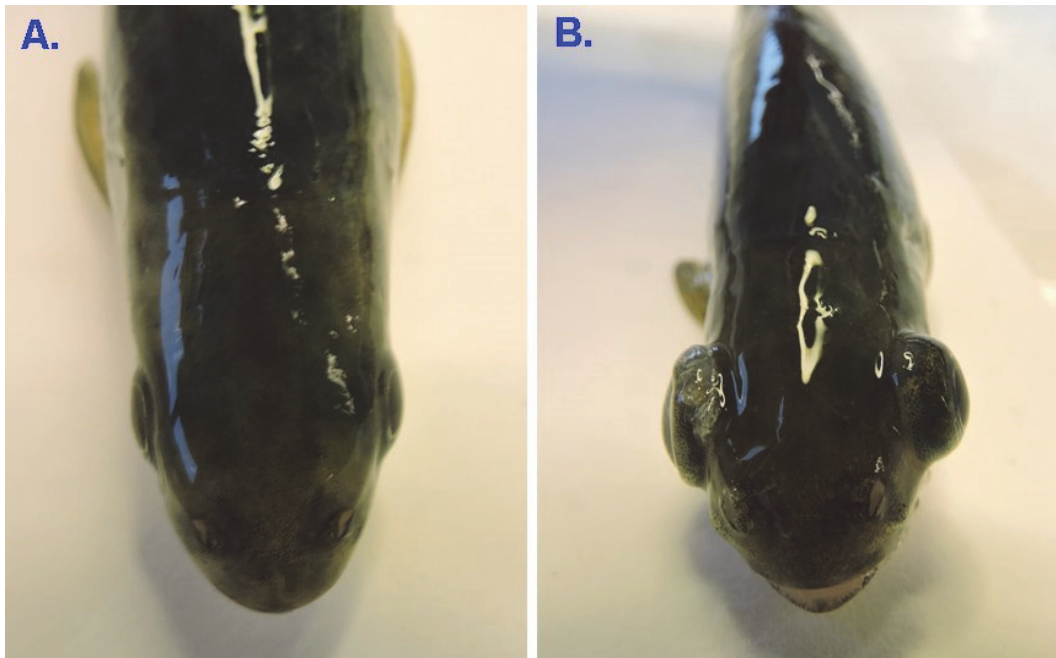


Fig. 28 Eksoftalmi. A. Normal, frisk fisk, B. Gassblæresyke, eksoftalmi (utstående øyne). Kun observert hos fisk med subakutt gassblæresyke., se Fig. 4 (Foto: Trond Einar Isaksen)

Tabell 10. **Kliniske tegn på gassblæresyke observert hos fisk i kar med ulike nivåer av TDG. Prevalens (%) av observerte gass embolier (gassbobler) i gjellekapillærer, bobler i finner, gjellelokk (operculum), munnhulen og sidelinjen (laterallinjen). Observasjoner av andre vanlige tegn på gassblæresyke inkluderer hemorragi (blødninger) og eksoftalmus (utstående øyner). Antall fisk undersøkt i hver gruppe er gitt (total n).**

Gruppe	T100	T105	T110	T115	T115*	T120	T130
Total N	60	60	60	40	20	60	5
Antall undersøkt N	60	60	59	20	10	15	5
TDG %	99.9±0.8	103.5±0.9	109.7±1.3	115.4±0.9	117-118 ^c	118.8±0.2 ^a	130-135 ^c
Eksponeringstid	12 dager	12 dager	9 dager	24 timer	8 timer	3 timer	< 1 time
Dødelighet	0	0	< 2 %	50 %	>50 %	>50 %	>50 %
Gass emboli gjeller	0	0	23 %	55 %	60 %	93 %	100 %
Hemorragi	0	0	2 %	10 %	50 %	80 %	100 %
Caudal finne	0	2 %	38 %	35 %	80 %	100 %	100 %
Rygg finne	2 %	5 %	23 %	20 %	90 %	80 %	60 %
Gatt finne	12 %	25 %	52 %	55 %	90 %	100 %	100 %
Buk finne	18 %	15 %	60 %	90 %	100 %	100 %	100 %
Bryst finne	5 %	2 %	53 %	65 %	80 %	100 %	100 %
Gjellelokk	0	0	7 %	0	0	0	0
Munnregionen	0	0	5 %	0	0	0	0
Eksoftalmus	0	0	2 %	0	0	0	0
Sidelinjeorganet	0	0	0	0	0	0	0

OPPSUMMERING

Det ble observert ulike stadier av gassblæresyke (GBD) i dette forsøket. Typiske symptomer for akutt GBD var økt dødelighet og svimeradferd innen kort tid (timer). Fisk med akutt GBD hadde synlige gassbobler i gjellekapillærene (gassemboli), indre blødninger og gassbobler i finnene. Subakutt og kronisk GBD utvikles over lengre tids eksponering (dager, uker). I tilfeller med subakutt / kroniske GBD i det gjennomførte forsøket ble det observert gassbobler i finner. I tillegg hadde fisken synlige gassbobler i hoderegionen og munnhulen. Eksoftalmus (utstående øyner) ble kun observert hos fisk i kar med 110 % TDG etter 9 dagers eksponering. Resultater og observasjoner fra dette gjennomførte forsøket har vist at:

- Gassovermetning medfører adferdsendring hos fisk. Vi registrerte en adferd som kunne variere fra panisk til apatisk hos fisk i kar med TDG > 110 %. Det ble observert fisker med kramper og forstyrret balanse. Raping (luftbobler fra munn) var vanlig. Det ble ikke registrert unormal adferd i gruppene med subakutt GBD og friske fisker, men det ble observert raping hos fisk i gruppen med 110 % TDG gjennom hele forsøksperioden.
- Forhøyet ventileringsrate og panisk adferd ble observert hos fisk i kar med TDG verdier >110 %. Dette er målbart i karforsøk og indikerer alvorlig stress hos fisk. I tillegg viste undersøkelsene at fisk som var langtidseksponert for gassovermetning med TDG 110 % hadde høyere Hct verdier sammenlignet med kontrollfisk (TDG 100 %) og fisk fra kar med TDG 105 %. Dette kan forklares med svelling av erythrocytter pga frigjøring av stresshormoner katekolaminer (Djordjevic et al. 2012; Lerfall et al. 2015; Nikinmaa 1982).
- Kliniske tegn på GBD varierte med TDG-konsentrasjon og eksponeringstid. Akutt GBD forekom i kar med TDG verdier over 110 %. Typiske tegn på akutt GBD i disse gruppene inkluderte

- gassemboli i gjellekapillærene og indre blødninger som skyldes sprenge blodkar. I alle tilfeller med GBD, både akutt og subakutt/kronisk, ble det observert varierende grad av gassbobler i finner. I tilfeller med subakutt GBD ble det i tillegg observert eksoftalmus (utstående øyne pga økt gasstrykk) og gassbobler i hoderegionen og munnhulen hos fisk etter 9 dagers eksponering med TDG 110 %.
- d) Fisk begynte å dø ved 109,7% TDG etter 9 dager og det var tegn til akutt gassblæresyke hos de overlevende.

Resultatene fra forsøket viser at akutt GBD med svimere og økt dødelighet forekommer med gassovermetning fra og med 114,8 % TDG innen 24 timers eksponeringstid hos parr av Atlantisk laks i grunt vann (0,3 m). Forsøket gir imidlertid ikke svar på hvordan GBD vil utvikle seg med hensyn til dødelighet i tilfeller med subakutt / kronisk GBD. Vi valgte å terminere gruppe 110 (TDG 109,7 %) etter 9 dager av dyrevelferdsmessige årsaker på grunn av omfattende kliniske tegn på kronisk GBD hos fiskene i denne gruppen. Alle fiskene i denne gruppen hadde gassbobler i finner ved terminering. Slike gassbobler i finnene kan over tid medføre finneerosjon med økt fare for infeksjoner og sykdom. Det er imidlertid uvisst om laks med GBD som observert hos fisk i gruppene med TDG verdier rundt 110 % eller lavere kan bli friske og symptomfrie ved overføring til normale TDG nivåer (100 % TDG).

3.3 Andre akvatiske organismer

Gassblæresyke rammer ikke bare fisk, men også andre akvatiske organismer. Det er likevel begrenset kunnskap om effekter av gassovermetning på akvatiske organismer utenom fisk, både når det gjelder vertebrater og evertebrater. Kontrollerte eksponeringsforsøk har blitt utført for noen Nord Amerikanske arter, og disse indikerer store artsmessige variasjoner i tåleevnen ovenfor gassovermetning. Få feltstudier eksistere uavhengig av organisme, og få studier gjelder for arter som finnes i Norge. Videre forskning bør fokusere på å tette disse kunnskapshullene.

Vertebrater

Når det gjelder vertebrater har Amerikansk oksefrosk (*Rana catesbeiana*) blitt eksponert for vann med 132,9%, 116,8% og 108,8% gassmetning (Colt, Orwicz, and Brooks 1987). Ingen kliniske tegn ble funnet på frosken i den laveste gassovermetningen. Froskene som ble eksponert for 116,8% gassmetning utviklet gassblærer under huden, noe som førte til at de fløt opp til vannoverflaten og ikke klarte å dykke. Froskene døde likevel ikke i løpet de fire dagene forsøket pågikk. 40% av froskene som ble eksponert for 132,9% gassmetning døde etter en dag som følge av bobler i blodkarsystemet.

Evertebrater

Flere studier viser at evertebrater også påvirkes negativt av gassovermetning. Nebeker m. fl. (1981) eksponerte fire Nordamerikanske vannlevende insekter for gassovermetning, en døgnflue, en vårflue, en stikkemygg og en fjærmygg. De fant at LC50 (konsentrasjonen der halvparten av individene dør) var 129% gassmetning for vårfluen *Timpanoga Hecuba*. For de andre artene klarte de ikke å finne LC50, men antok at denne var høyere enn 129% (Nebeker, Baker, and Weitz 1981). I et annet studie fant man at ti-dagers LC50 (halvparten av individene dør i løpet av ti dager) var 118% gassmetning for vannloppen *Daphnia magna*, 133% for signalkreps (*Pacifastacus leniusculus*) og 125% for tre steinfluearter (*Acroneuria californica*, *A. pacifica* and *Pteronarcys californica*) (Nebeker 1976; Nebeker, Bouck, and Stevens 1976). Gassovermetningen førte her til bobledannelser (emboli) i kroppsvæsker og indre organer. I Norge har det blitt utført ett preliminært labforsøk som testet effekter av gassovermetning på bunndyr. Studien fant varierende effekter avhengig av art, og at man kan forvente negative effekter fra ca 109% gassmetning, og kanskje enda lavere (Velle m.fl. upublisert, Fig. 29).

Ikke-dødelige effekter

Vi vet foreløpig lite om dyrenes evne til restitusjon etter gassblæresyke, om stress-på-stress effekter, om sekundære effekter eller om de har evne til unnvikelsesadferd. Det er for eksempel naturlig å tenke seg at dyr som får blærer i huden som følge av gassovermetning kan være utsatt for infeksjoner og soppangrep, også når gassblærene forsvinner. Det er også sannsynlig at dyr som utsettes for flere stressfaktorer samtidig, for eksempel forsuring, ugunstige temperaturforhold og høyt predasjonstrykk, også har lavere tåleevne ovenfor gassovermetning. Det er gjort noen forsøk på å finne subletale effekter. Slike forsøk viser at subletale effekter kan oppstå ved lavere gassmetning enn LC50-verdiene for akutt dødelighet. For eksempel ble tarmen til vannloppen *Daphnia magna* blokkert av bobler ved 115% gassmetning, selv uten akutt dødelighet (Nebeker, Stevens and Brett 1976). Dyr som har blitt eksponert for gassmetning flyter også opp og får problemer med å dykke (Montgomery and Fickeisen 1979; Nebeker 1976; Colt, Orwicz, and Brooks 1987). Vannstrømmen i elver vil føre dyrene bort fra habitatet, og dyrene forventes å ha høy dødelighet.



Foto: G. Velle

Fig. 29 Bildet viser døgnfluen *Baetis rhodani* med tydelige bobler i kroppen som følge av gassovermetning. Fluen var eksponert for 115% gassmetning i fire dager. Boblene gjør at dyret først flyter opp og deretter dør. (Foto G.Velle)

Dyrene vil mest sannsynlig dø i løpet av kort tid selv om gassboblene ikke gjør direkte skade, enten som følge av predasjon, som følge av sult eller fordi dyrene føres til et lite gunstig habitat. Ved eksponering over lengre tid kan vi dermed forvente høy dødelighet ved lavere gassmetning enn LC50 tilsier. Det er dermed klart at effektene av gassmetning påvirkes både av konsentrasjonen av gassmetning og av tiden dyrene er eksponert. Gassovermetning kan også påvirke samfunnsstrukturen av bunndyr. I en studie fra Otra ble det funnet signifikant lavere tettheter og biologisk mangfold av bunndyr i områder påvirket av gassovermetning enn i et kontrollområde (Velle et al. 2017). Artssammensetningen var også forskjellig i påvirket område, med dominans av gravende arter (fåbørstemark og rundorm). Lav tetthet av fisk og bunndyr vil påvirke økosystemtjenester gjennom redusert mulighet for fiske som rekreasjon. Vi kan forvente av effekten av gassovermetning på bunndyr også påvirker andre økosystemtjenester, slik som filtrering av vann og nedbryting av organisk materiale og gjenvinning av næringsstoffer. Studien fra Otra kan også tyde på at effekten av gassovermetning likner på effekter av sur nedbør. Flere av de samme artene er sårbare for begge effekter, og i områder med gassovermetning vil Indeks 2 indikere forsurening (Velle m.fl. 2016, Figur 30). Dette resultatet indikerer at man kan feiltolke gassovermetning som eposider med forsurening.

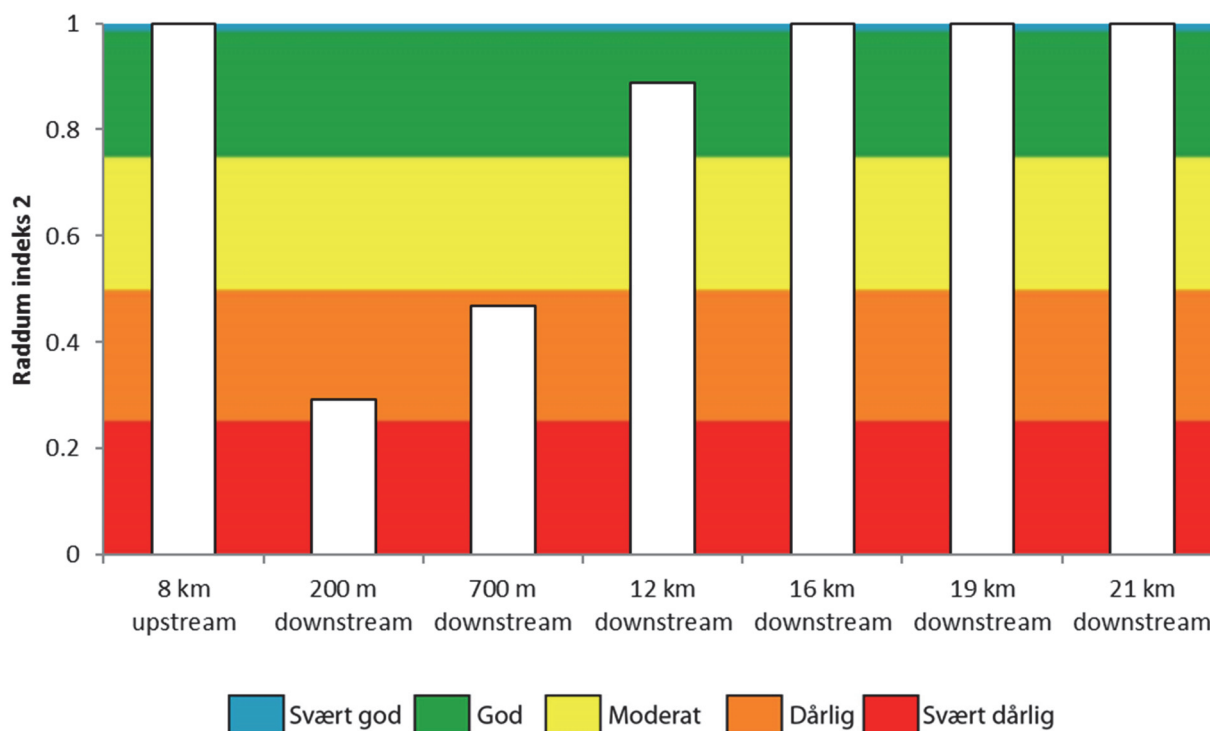


Fig. 30 Forsuringsindeks 2 i en gradient fra oppstrøms Brokke (ikke påvirket av gassovermetning) og nedstrøms Brokke (i minkende grad påvirket av gassovermetning). Resultatene tyder på at forsuring og gassovermetning kan ha lik effekt på bunndyrene.

3.4 Trykk i omgivelse, kompensasjon og habitat (etiologi)

Gassblæresyke skyldes som tidligere nevnt gassovermetning, men effekter av gassovermetning er avhengig av trykket i omgivelsene og med dette av hydrostatisk trykk og vanddyb. Etter Henrys lov (Henry 1803) er løslighet av gasser i vann proporsjonalt til trykk. Vann som står under to atmosfæres trykk kan forenklet sett løse to ganger mer gass enn vann som står under en atmosfæres trykk (ved overflaten). Forenklet kan altså vann i 10 m dyp løse 200 % av gasmengden som vann ved overflaten og vann på 1 m dyp 110 % (ved 0 moh.). Gassovermettet vann vil først kunne føre til bobledannelse i vann og i kroppen til fisk når totaltrykket (vanligvis atmosfærisk trykk og hydrostatisk trykk) er mindre enn gasstrykket i vannet (Rogers 2005). Fisk som lever i vann med 120 % TDG (0 moh.) vil ikke oppleve gassovermetning så lenge de holder seg under 2 m dyp. Fisk som er på 1 m dyp opplever et gasstrykk som tilsvarer 110 % overmetning (Weitkamp and Katz 1980). Fisk kan altså kompensere for gassovermetning dersom den står dypt nok. Habitatforhold, vanddyb og bassengdyp må derfor tas i betraktning når effekter av gassovermetning og resultater av forsøk skal vurderes (Beeman and Maule 2006). Dette er en viktig faktor dersom resultater fra forsøk og klekkerier med små kar skal overføres til vassdrag og bidra å forklare tilsynelatende sprikende resultater i tåleforsøk av fisk, se kap. 3.5. Gassmetning i prosent referer til gassmetningen ved vannoverflaten, hvis ikke det er angitt noe annet.

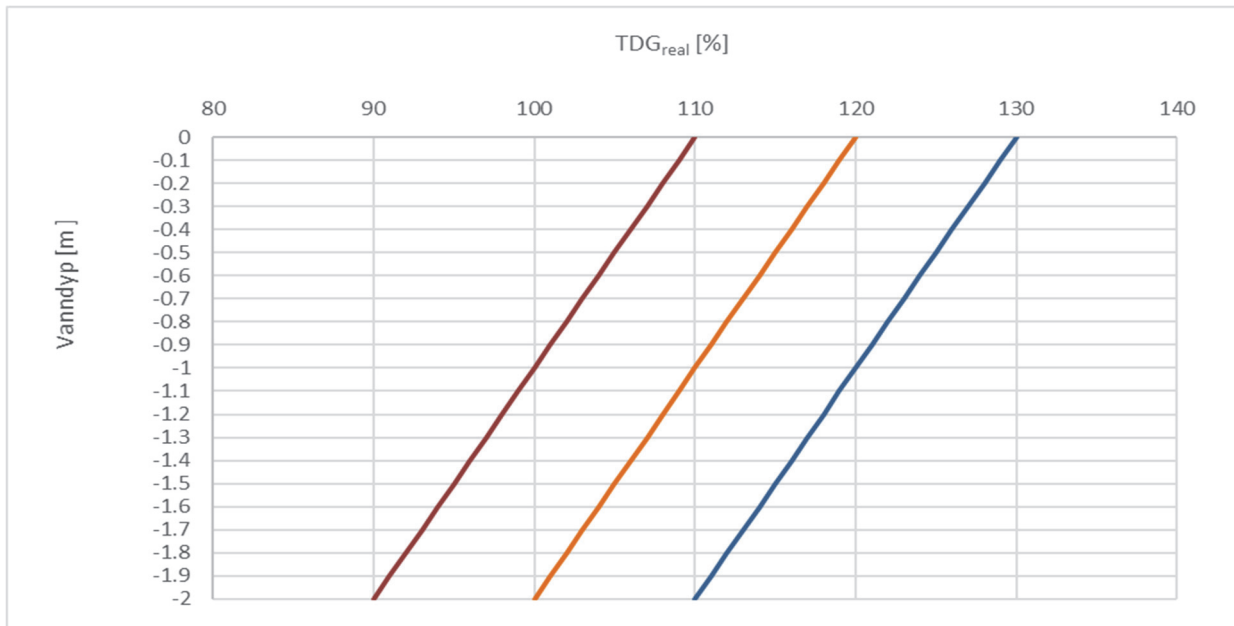


Fig. 31 Reel metning av gasser (TDG) i vann avhengig av vanndyp og hydrostatisk trykk, forenklet etter Henry (1803).

3.4.1 Gassammensetning - bare farlig med nitrogen?

I likevekt er sammensetningen av TDG i vann proporsjonalt til gassene i luft, korrigert for enkeltgassenes løselighet i vann. Luftens oksygen har bare en fjerdedel av partialgastrykket i forhold til nitrogen, men har ca. dobbelt så god løselighet i vann. Partialtrykket av oksygen i vann ligger derfor rundt 35 %, mens det ligger rundt 64% for Nitrogen, dersom luft løses i vann. CO₂ og Argon blir ofte neglisjert siden de bidrar lite, i visse situasjoner kan imidlertid sammensetning av gassene variere betydelig og spille en viktig rolle, særlig når det ikke løses gass fra luft, men fra biologiske eller geologiske prosesser i vann, for eksempel O₂ under fotosyntese eller CO₂ i klekkerier eller fra geologiske kilder (Harvey 1975).

I eldre amerikansk litteratur er det kun fokusert på nitrogen som årsak til gassblæresyke (Ebel 1969; Ebel, Dawley, and Monk 1971; Fast 1979; MacDonald and Hyatt 1973b). Man vurderte at det inerte nitrogenet var skadelig, i motsetning til oksygen som kunne tas opp av blodet og brukes i fysiologiske prosesser. Også publikasjoner i Norge fokuserer ensidig på nitrogen. Thorstad et al. (1997) fokuserte utelukkende på nitrogen og betraktet oksygen som «ikke i seg selv tilstrekkelig for å fremprodusere LBT» (luftblæretrauma, altså det vi kaller gassblæresyke). En aktuell veileder om fiskevelferd i oppdrettsanlegg (Noble et al. 2018) anbefaler grenseverdier for nitrogenmetning fra litteraturen uten å referere til betydning av total gassmetning.

Oppfatning av at nitrogen er eneste årsak til gassblæresyke ble allerede motbevist i (Weitkamp and Katz 1980) som referer til eksperimenter der 160 % ren oksygenovermetning førte til gassblæresyke hos regnbueørret. Forfatterne understreket betydningen av totalgastrykket for dannelse av bobler. Fisk tar opp en del av oksygenet og tåler oksygenovermetning langt bedre enn nitrogenovermetning. Men også overmetning med ren oksygen og særlig en gassblanding – det vanlige – kan danne bobler og føre til gassblæresyke. At det ikke observeres mer gassblæresyke i klekkerier eller oppdrettsanlegg med O₂ overmetning, kan ikke bare forklares med at fisk tåler O₂ bedre, men også med at totalgassmetning kan være lav nok. Det er totalgassmetningen mot ytre trykk som er avgjørende for dannelse av bobler. Utover dette kan det hende at gassovermetning og dens effekter delvis blir oversett, særlig ved subletale nivåer.

For å vurdere risiko for gassblæresyke og effekter i både oppdrettsanlegg og i naturen bør det legges til grunn totalgassmetning og så partialgasstrykket av enkeltgasser.

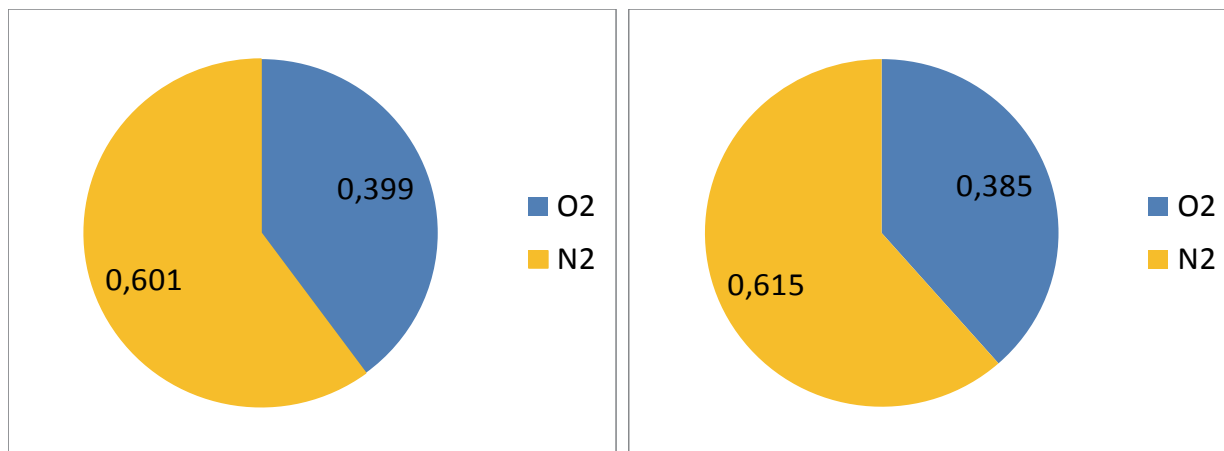


Fig. 32 Andel løst N₂ og O₂ i vann fra Evanger kraftverk (til venstre) og Vosso (til høyre). Verdiene tyder på at gassovermetningen stammer fra oppløsning av luft (TDG data se Tabell 4).

3.5 Risikovurdering av gassovermetning for fisk

Det mangler grenseverdier og direkte retningslinjer for å håndtere kunstig gassovermetning i vassdrag i Norge og ellers i Europa. Dersom organismer blir rammet av gassovermetning skal dette kunne fanges opp indirekte, for eksempel hvis kvalitetselement fisk reduseres lavere enn «god tilstand» grunnet gassovermetning, skal dette fanges opp av vannforskriften og en rekke andre lover og regler (Kvalitetsnorm villaks, Lov om laks og innlandsfiske o.l.). Det mangler imidlertid en grenseverdi eller retningslinjer som gjør gassmetning direkte håndterbart for forvaltning og industri som miljøfaktor i vassdrag. I det følgende har vi utarbeidet et risikovurdering av miljørisiko forbundet med eksponering for gassovermetning i den grad det var mulig med dagens kunnskap. Vi begynner med en kort oversikt av retningslinjer i land som erkjenner gassovermetning som miljøfaktor.

I Canada har det vært brukt retningslinjer som satte en grenseverdi ved 103 % TDG i grunne elver (< 1m) og 110 % i dype elver (> 1 m, Environment 1999). I USA har det blitt brukt 110-115 % i flere delstater (Weitkamp 2008). Weitkamp diskuterer å heve grensen til 120 % siden det ble funnet lav eller ingen dødelighet blant stillehavslaks i dype elver. Lav dødelighet under 120 % TDG skyldes at fisken ofte oppholder seg under 2 m dyp i de store og dype elver langs vestkysten av Nord Amerika. Dessuten skal det i praksis være vanskelig å holde seg innenfor 110 % TDG i de store elvene der overmetningen oppstår når vannet slippes over demninger og flomluker. Utover dette argumenteres at det finnes naturlig overmetning (Weitkamp 2008). En slik vurdering tar imidlertid ikke hensyn til grunne elver eller arter og livsstadier som står eller vandrer på grunt vann, selv når dypere partier finnes. Dessuten er naturlig gassovermetning oftest kortvarig (timer og dager, ikke uker), moderat (< 110 %), knyttet til høy vannføring og medfører samtidig større kompensasjonsmuligheter når vannstanden er høy. Diskusjonen synliggjør et dilemma ved grenseverdier for gassovermetning. Det er vesentlige forskjeller mellom miljøeffekter avhengig av dose, varighet, art, stadium og vanddyp og det er derfor lite treffende med bare en grenseverdi.

3.5.1 Risikovurdering

Resultater fra denne kunnskapsoppsummeringen indikerer at miljøeffekter er avhengig av gassovermetningsomfang, varighet, vanddyb, samt art og stadium av dyr som rammes. Derfor kan en risikovurdering bare ha mening hvis den sier for hvilken art og stadier (eller samfunn) den gjelder. Samtidig bør den også inkludere en dose- og tidsfaktor (eksponering) samt en dybdefaktor. Det forutsettes videre at det er løst luft som danner kilden for gassovermetning. Risiko for miljøeffekter forårsaket av gassovermetning deles i fire hovedgrupper (Tabell 11): Ved ingen eller veldig lav eksponering med gassovermettet vann finnes typisk ingen miljøeffekter (kategori 1, lav risiko). Ved økende eksponering dukker det opp målbare effekter (kategori 2, moderat risiko). Dette er først og fremst subletale effekter som boble- og sårddanning samt sekundærinfeksjoner eller froskeøyne. Øker eksponeringen ytterligere begynner fisk å dø av akutt gassblæresyke. Vi foreslår å skille mellom begynnende dødelighet (LT_{0-50} , kategori 3, høy risiko) og dødelighet over 50 % (LT_{50-100} , kategori 4, svært høy risiko). På denne måten vil det være mulig å lage en risikomatrix som knytter eksponeringen til en forventning om konkrete miljøeffekter.

Tabell 11. **Risikovurdering for gassblæresyke som følge av eksponering for gassovermetning**

Risiko	Betydning	Forventet effekt
Lav	Effekter relatert til gassblæresyke ikke sannsynlig	Ingen dødelighet eller kroniske effekter sannsynlig
Middels	Målbare effekter i dyr sannsynlig, hovedsakelig subletal	Subletale effekter sannsynlig, for eksempel, gassbobler, blodninger, sekundærinfeksjoner, på lang sikt også dødelighet
Høy	Første tilfeller av akutt gassblæresyke sannsynlig	Sannsynlig at dyr begynner å dø
Svært høy	Akutt gassblæresyke i de fleste fisk sannsynlig	Sannsynlig med høy dødelighet (> 50 %)

Det finnes data til en slik risikovurdering for en rekke vel undersøkte arter, først og fremst pasifiske laksefisk, for eksempel regnbueaure. I de siste årene finnes dessuten økende kunnskap om kinesiske arter og da særlig karpefisk (se Tabell 15). For norske arter er en slik vurdering imidlertid bare mulig for Atlantisk laks og da bare for yngel og parr. Det er bare for disse det finnes systematiske forsøk om TDG tåleevne, se kap. 3.2 og (Krise and Herman 1991). Å overføre resultater fra stillehavslaks på Atlantisk laks kan være villedende. Resultatene i Tabell 10 og Fig. 33 tyder på at Atlantisk laks er mer sårbar enn stillehavslaks. Eksponeringstid som førte til en 50 % dødelighet av lakseparr (LT_{50} , kap. 3.2) var 24 timer ved 114,8 %, 8 timer ved 117,5 %, 3 timer ved 118,8 % og 1 time ved 132,5 %. Dette er en betydelig lavere eksponering enn LT_{50} for 10 cm lang regnbueaure (5 timer ved 140 %, 54,6 timer ved 122 %, 216 timer ved 116 %, (Antcliffe, Fidler, and Birtwell 2002a) og 12 cm lang Chinook (13,6 timer ved 121 %, 26,9 timer ved 116 %, (DAWLEY and EBEL 1975). Krise & Hermann (1991) finner lengre tid for LT_{50} for Atlantisk laks ved sammenlignbar dose (118 %) men her ble forsøket standardmessig gjennomført i 96 timer. Det kan derfor ha vært en tidligere bølge med dødelighet tidligere uten at det ble fanget opp. En slik bølge med høy dødelighet er typisk ved gassblæresyke. Mange fisk dør tilnærmet samtidig etter en viss eksponering mens en del individer kan holde ut lengre og dør gradvis deretter (Marsh and Gorham 1905; Bouck et al. 1976).

Basert på forsøkene som finnes kan risikomatriksen ovenfor anvendes for parr av Atlantisk laks blant de norske artene (Tabell 12). De fleste kategoriene kan baseres på resultater fra forsøk (Krise and Herman 1991) og kap. 3.2, men det må delvis også brukes skjønn for eksponeringer som enda ikke er testet. Dette er merket i tabellen, * = vist i forsøk og [?] = interpolert/skjønn.

Med hjelp av tabellen kan det skilles mellom risiko knyttet til effekter av gassovermetning av luft for lakseparr som står varig i grunt vann (0,3 m). Skillet mellom lav og høy risiko settes ved 116 % (ved korttidseksponering < 1 t), 114 % (< 10 t) og 109 % ved lengre eksponering (basert på data i Tabell 11). Subletale langtidseffekter forventes først fra en eksponeringstid over 10 timer og disse forventes for en gassmetning fra 103 % opp til 109 %. Bobledanning er avhengig av hydrostatisk trykk og verdiene fra tabellen kan korrigeres for dette dersom toleransen i større dyp skal bedømmes, se eksemplene for 0,5 m og 1 m i Tabell 13 og Tabell 14. I følge Krise & Hermann (1991) tåler lakseyngel (0+, 63-66 mm) ca. 2-4 % TDG mer enn parr.

Tabell 12. Risiko for effekter på Atlantisk lakseparr ved gassovermetning og varig opphold ved vanddyb 0,3 m (* dokumentert i forsøk, ^[2] interpolert/skjønsmessig vurdering).

Gassmetning [% TDG]	<1 time	<10 timer	<100 timer	<1000 timer
<105 %	Lav*	Lav*	Lav*	Lav ^[2]
105-109 %	Lav*	Lav*	Moderat ^[2]	Moderat ^[2]
109-114 %	Lav*	Lav*	Høy ^[2]	Høy*
114-116 %	Lav*	Høy*	Svært høy*	Svært høy ^[2]
116-122 %	Høy ^[2]	Svært høy*	Svært høy*	Svært høy ^[2]
122-132 %	Høy ^[2]	Svært høy*	Svært høy ^[2]	Svært høy ^[2]
> 132 %	Svært høy*	Svært høy ^[2]	Svært høy ^[2]	Svært høy ^[2]

Tabell 13. Risiko for effekter på Atlantisk lakseparr ved gassovermetning og varig opphold ved vanddyb dypere enn 0,5 m (basert på tabell ovenfor, korrigert for hydrostatisk trykk).

Gassmetning [% TDG]	<1 time	<10 timer	<100 timer	<1000 timer
<107 %	Lav	Lav	Lav	Lav
107-111 %	Lav	Lav	Moderat	Moderat
111-116 %	Lav	Lav	Høy	Høy
116-118 %	Lav	Høy	Svært høy	Svært høy
118-124 %	Høy	Svært høy	Svært høy	Svært høy
124-134 %	Høy	Svært høy	Svært høy	Svært høy
> 134 %	Svært høy	Svært høy	Svært høy	Svært høy

Tabell 14. Risiko for effekter på Atlantisk lakseparr ved gassovermetning og varig opphold ved vanddyb dypere enn 1 m (basert på tabell ovenfor, korrigert for hydrostatisk trykk).

Gassmetning [% TDG]	<1 time	<10 timer	<100 timer	<1000 timer
<112 %	Lav	Lav	Lav	Lav
112-116 %	Lav	Lav	Moderat	Moderat
116-121 %	Lav	Lav	Høy	Høy
121-123 %	Lav	Høy	Svært høy	Svært høy
123-129 %	Høy	Svært høy	Svært høy	Svært høy
129-139 %	Høy	Svært høy	Svært høy	Svært høy
> 139 %	Svært høy	Svært høy	Svært høy	Svært høy

3.5.2 Risikovurdering for fiskepopulasjoner i vassdrag i Norge

Resultater fra laborforsøk kan i utgangspunktet ikke direkte overføre til forhold i felt og dette gjelder særlig for effekter av gassblæresyke som er avhengig av vanddyp. Det er derfor nødvendig med studier i felt som inkluderer muligheten av at fisk kan unngå skader ved å unnvike, men også indirekte effekter som økt predasjon av svekket fisk, sekundærinfeksjoner og langtidseffekter. Slike studier finnes i svært liten grad. Burforsøk med begrenset mulighet for trykkkompensasjon har blitt gjennomført med ørret, abbor og ål i Nidelva (Heggberget 1984; Blindheim et al. 1984) men denne eldre studien er basert på grove og sjeldne målinger samt stor dødelighet i referansegruppen. Det er derfor vanskelig å trekke konklusjoner. Burforsøk gjennomført med laksesmolt (ca. 15 cm) i Vosso (Stenberg et al. 2018) viste at det var ingen fisk som døde eller hadde tegn til subletale effekter etter 14 dager i bur med 0-1 m vanddyp og median dose mellom 105,6 og 107,5 %. Preliminære resultater fra burforsøk i et pågående prosjekt i Modalselva viste ingen målbare effekter eller dødelighet hos laksesmolt ved 104 % medianmetning i bur med 0-80 cm dyp og 14 dager eksponering. Erfaringer fra et pilotforsøk i Otra med 50 cm dype bur viste at laks (bleke 12-16 cm) fikk akutt gassblæresyke med dødelighet ved medianverdier mellom 108 % og 112 % TDG. Stenbergs resultater og erfaringene fra Modalselva og Otra ser ut til å passe med risikovurderingen i tabellene vist ovenfor. Det må imidlertid understrekes at disse dataene bare dekker relativt lave gassmetningsverdier og at det mangler studier ved høyere doser samt langtidseffekter ved forskjellige doser. Dessuten mangler undersøkelser som inkluderer sekundærinfeksjoner, atferd av fisk (for eksempel unnvikelse), predasjon og habitatbruk. Systematiske feltundersøkelser med merking av ville fisk, tilstrekkelig logging av gassmetning og referanser mangler. Det er derfor ikke nok kunnskap for å sammenstille en risikovurdering generelt for norske fisk- og bunndyrarter.

For ungfisk av laks i elver kan risikomatriksen som er vist i Tabell 12 benyttes, og det er avgjørende i hvilken dyp fiskene oppholder seg. Har man kunnskap om dette kan verdiene tilpasses ved å bruke en korrigerende avhengig av vanddyp som beskrevet i kap. 3.4, se eksempel i Tabell 13 og Tabell 14 som angir risikokategorier for lakseparr som oppholder seg under 0,5 og 1 m dyp. I de fleste situasjoner vil ungfisk av laks bruke grunne områder. Dette og føre var prinsippet grunnet stor usikkerhet knyttet til langtidseffekter, taler for å anvende risikovurderingen for grunt vann som utgangspunkt, inntil bedre kunnskap foreligger. Dvs. gassmetning bør ligge under 109 % TDG dersom ungfisk av laks ikke skal dø av den. Sjeldne og kortvarige topper opp til 114 % (< 10 timer) og 116 % (< 1 time) kan tolereres. Skal også subletale langtidseffekter i grunne habitater kunne utelukkes, bør det ikke være kunstig og langvarig gassovermetning over ca. 105 %. Erfaringene tilsier imidlertid at dette gjelder særlig for bassenger der fisk ikke kan unnvike. I naturen har vi ikke observert effekter av gassblæresyke ved metninger under 108 %.

Utover fiskenes tåleevne er det flere andre behov som må hensyntas ved en risikovurdering: For det første gjelder det å avklare om det finnes gassovermetning og om det dreier seg om kunstig eller naturlig overmetning samt årsakene til overmetning. Utlufting av overmettet vann og fortykning fører til at gassovermetningen gradvis avtar nedstrøms utslippspunktet og det vil derfor vanligvis kun være et en del av elvens lengde som er påvirket. Vi anbefaler derfor at overmetningens omfang og transport kartlegges og påvirkningsområdet identifiseres, samt å vurdere om gassovermetning skyldes naturlige eller kunstige kilder. Gassmetning bør måles oppstrøms (referanse) og rett nedstrøms vannutslipp der man antar å finne de høyeste verdiene. Deretter bør transport og påvirkningsområde kartlegges ved oppsett av flere loggere. Gassovermetning kan forekomme uventet og være kortvarig. Verdiene bør derfor overvåkes over tid (se kap. 4).

Fastsetting av retningslinjer og grenseverdier angående gassovermetning er en forvaltningsoppgave og er bl.a. avhengig av målet som skal oppnås. Dersom det legges til grunn lakseparrens tåleevne kan tabellene på s. 43 brukes som grunnlag i et forvaltningsregime. Siden det er kunnskapsmangel om andre arter og stadier samt om effekter på biodiversitet og biologisk produksjon bør det legges stor vekt på føre var prinsippet, dersom miljøskader skal unngås.

3.5.3 Ferskvannsfisk og bunndyr utenfor Europa

Vi har gjennomgått en rekke studier om internasjonal litteratur der det finnes mere data om gassovermetning i elver og fiskenes tåleevne (>300 vitenskapelige artikler og bokkapitler). Det finnes mest litteratur om Nordamerikanske arter, særlig stillehavslakser. I nyere tid finnes det i økende grad kunnskap om kinesiske arter. Litteratur om gassovermetning i elver har bare blitt funnet fra USA, Kina, Canada og Norge, i denne rekkefølgen. Ellers i verden virker dette problemet ukjent og oversett og det er særlig påfallende at det er i europeiske vassdrag gassovermetning og gassblæresyke ikke håndteres som miljøfaktor. Selv om historisk sett viktige oppdagelser er gjort her og problematikken er vel kjent i klekkerier, blir den oversett som miljøfaktor i Europa og de fleste andre steder i verden. Mangels kunnskap om europeiske arter har det i norske rapporter blitt anbefalt nordamerikanske grenseverdier (Blindheim et al. 1984; Thorstad et al. 1997; Pulg, Sebastian Stranzl, et al. 2016).

Med grunnlag i denne kunnskapsoppsummeringen vil imidlertid advare å bruke disse verdier 1:1 for andre arter. Litteratursammenstillingen vår viser at det er store variasjoner i tåleevne mellom arter og stadier. Dessuten ser Atlantisk laks ut til å høre til de mer sårbare arter med mindre tåleevne enn for eksempel andre salmonider som regnbueørret eller chinook. I Tabell 15 har vi sammenfattet studier som omhandler tåleevne av dyr ovenfor gassovermetning og som hadde følgende minstekriterier:

- Informasjon om art og stadier
- Data om vanddyp i forsøkskarene
- Regelmessig logging av totalgassmetning (TDG) under hele forsøket eller nok data om partialgasser for å kunne beregne TDG
- Temperaturdata
- Eksponeringstid
- Data om mortalitet avhengig av dose og eksponeringstid.
-

Selv om det ikke finnes systematiske data om norske arter utenom laks kan det det leses noen generelle trekk i datasettet. Legges dataene fra Tabell 15 inn i en scatter plot med dose og eksponeringstid til 50 % mortalitet (LT_{50}) og grupperes artene etter ordning, kan dødelighet grunnet gassovermetning beskrives som en negativ logaritmisk funksjon av dose (TDG) og eksponeringstid: dess større dose, dess mindre tid før fiskene dør. Det gjelder for laksefisker (særlig *Onchorhynchus* spp.) og karpefisker, uavhengig art. For de andre fiskeordninger finnes ikke nok data. Forholdet flater ut når dosen reduseres og det kreves langt mere tid før høy dødelighet oppnås.

Denne sammenhengen underbygger vår måte å vurdere risiko ved å koble dose til eksponeringstid (kap. 3.5.1). Dataene indikerer dessuten at karpefisk tåler mer gassovermetning enn laksefisk. Ingen forsøk med karpefisk oppnådde L_{50} under 120 % TDG, mens ingen av forsøkene med laksefisk oppnådde L_{50} under 110 % TDG. Forsøks tiden var imidlertid begrenset og det er derfor usikkert om LC_{50} kunne har blitt oppnådd også ved lavere TDG- nivåer ved økt eksponeringstid.

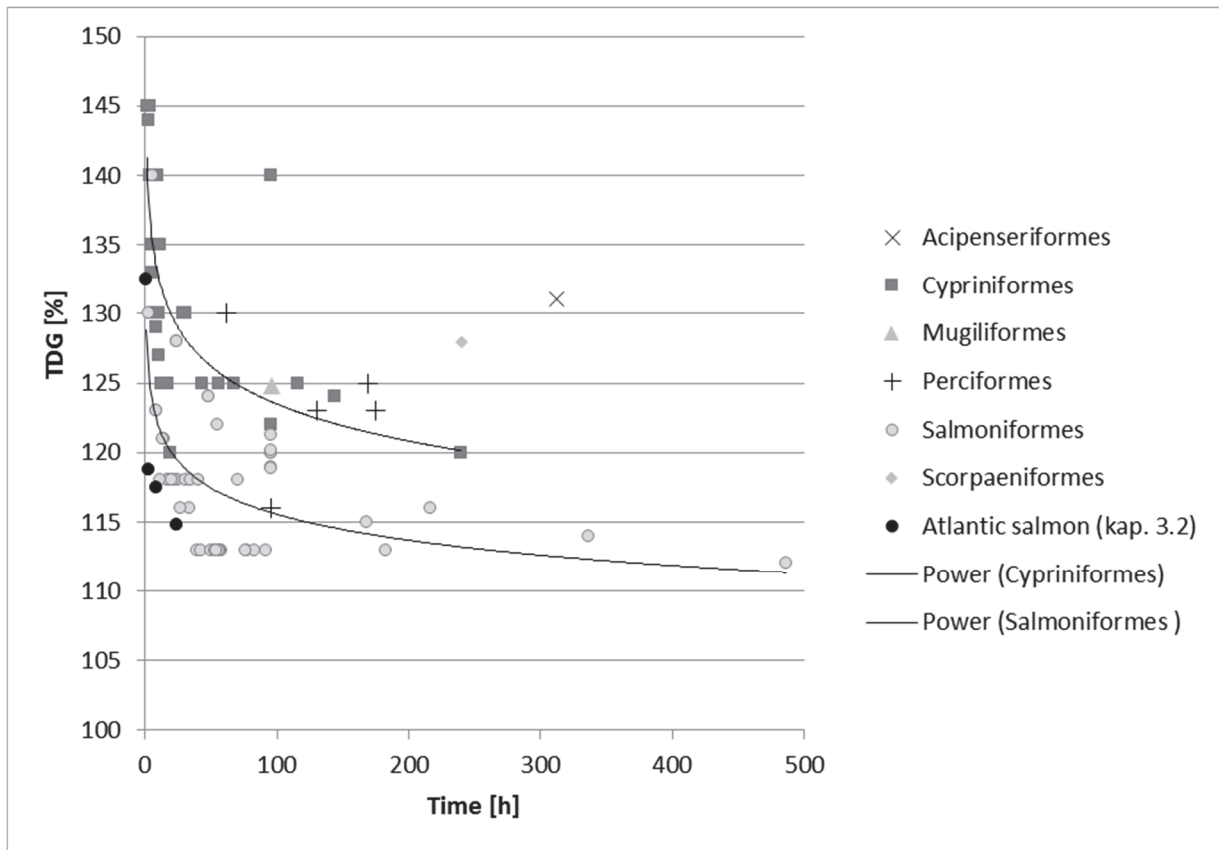


Fig. 33 Dødelighet ovenfor gassovermetning hos ulike ordener av fisk er funksjon av tid og dose, LT₅₀ (50 % mortalitet) med data fra Tabell 15. Dataene er sammenfattet for flere orden av fisk. For laksefisk og karpfisk er det plottet inn en trendlinje (power analysis, $R^2 = 0,37$ og $0,4$). Resultatene med laks fra denne studien (kap. 3.2) er i tillegg plottet som svarte punkter. Acipenseriformes = Størfisker; Cypriniformes = Karpfisker; Mugiliformes = Multer; Perciformes = «aborrlignende fisk», piggfinnefisker; Salmoniformes = Laksefisker; Scorpaeniformes = Ulkefisker

Tabell 15. Studier for tåleevne av dyr ovenfor gassovermetning

Salmoniformes Species	Threshold levels LC ₅₀ , LT ₅₀	Summary	Region	Environment	Reference
Rainbow trout (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	0% mortality at 114% TDG - 8d 0% mortality at 110% TDG - 8d LT ₅₀ 140% TDG - 5,1h LT ₅₀ 122% TDG - 55h LT ₅₀ 116% TDG - 216h	Exposure of juvenile rainbow trout to TDG levels from 110%-144% at 0.25 m depth and 10 °C.	North America	River (laboratory bioassay)	(Antcliffe, et al. 2002a)
Rainbow trout (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	LC ₅₀ 125 % TDG, 30h	Parr and "juvenile" rainbow trout, depth 1 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Bouck et al 1976)
Rainbow trout (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	LC ₅₇ 115 % TDG, 168 h	16,5-19,5 cm rainbow trout, depth 0.25 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Dawley et al 1976)
Rainbow trout (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	LC ₅₀ 121 % TDG (calculated), 14,2h	13 cm rainbow trout, depth 0.25 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Dawley and Ebel 1975)
Rainbow trout (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	LC ₅₀ 116 % TDG (calculated), 33,3h	13 cm rainbow trout, depth 0.25 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Dawley and Ebel 1975)
Rainbow trout (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	LC ₅₀ 112 % TDG (calculated), 480h	13 cm rainbow trout, depth 0.25 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Dawley and Ebel 1975))

Sockeye salmon (<i>Oncorhynchus nerka</i>)	LC50 125 % TDG, 40h	Parr, depth 1 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Bouck et al 1976)
Chinook salmon (<i>O. tshawytscha</i>)	LC50 121 % TDG (calculated), 13,6h	11-12-cm chinook salmon, depth 0.25 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Dawley and Ebel 1975)
Chinook salmon (<i>O. tshawytscha</i>)	LC50 116 % TDG (calculated), 26,9h	11-12-cm chinook salmon, depth 0.25 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Dawley and Ebel 1975)
Chinook salmon (<i>O. tshawytscha</i>)	LC50 Ca. 130 % (N ₂), 120 % O ₂ ; 3 h ≈ 130 % TDG at 15°C	Juvenile wild chinook salmon exposed in hatchery tanks at 0,2 m depth and increased temperature form 10 to 15°C, More than 60 % of fish survived in a second tank at 9 m depth throughout the experiment	North America	River (laboratory bioassay)	(Ebel, Dawley and Monk 1971)
Chinook salmon (<i>O. tshawytscha</i>)	LC50 130 % TDG C	Depth < 1 m	North America	River (laboratory bioassay)	Bouck et al 1976 in Weitkamp & Katz 1980
Chinook salmon (<i>O. tshawytscha</i>) Steelhead (<i>O. mykiss</i>) Sockeye salmon (<i>O. nerka</i>)	> 125% TDG – GBD symptoms uncommon (<0,5%) both species Sockeye Salmon most prone to GBT, followed by Steelhead . Chinook salmon GBT symptom rarely observed even when >130% TGP	From 1995 to 1999 incidence of GBT related to total dissolved gas supersaturation levels in adult chinook salmon, steelhead and sockeye salmon has been examined. Bonville Dam, Columbia river basin.	North America	River (field study)	(Backman and Evans 2002)
Chinook salmon (<i>O. tshawytscha</i>)		Adult female spring chinook salmon were exposed to TDG levels from 114.1% to 125.5%. TDG saturation did not have any effect on pre-spawning mortality or fecundity.	North America	River (laboratory bioassay)	(Gale, et al. 2004)
Coho salmon (<i>O. tshawytscha</i>)	LC50 125 % TDG, 12h	Parr, depth 1 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Bouck et al 1976)
Coho salmon (<i>O. tshawytscha</i>)	LC50 125 % TDG, 19h	Adult, depth 1 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Bouck et al 1976)
Coho salmon (<i>O. tshawytscha</i>)	LC50 Ca. 130 % (N ₂), 120 % O ₂ ; 3 h ≈ 130 % TDG at 15°C (calculated)	Juvenile hatchery coho salmon exposed in tanks at 0.2 m depth and increased temperature form 10 to 15°C, More than 90 % of fish survived in a second tank at 9 m depth throughout the experiment	North America	River (laboratory bioassay)	(Ebel, Dawley and Monk 1971)
Cutthroat trout (<i>Oncorhynchus clarkii</i>)	LC₅₀ = 119-120% TDG adult – 96h 119% TDG juvenile - 96h	Speckled dace and juvenile cutthroat trout have been exposed to TDG levels from 110% - 142%.	North America	River (laboratory bioassay)	(Nebeker, et al. 1980)
Cutthroat trout (<i>Oncorhynchus clarkii</i>)	128% TDG 100% mortality in 1 day 124% TDG 100% mortality in 2 days 120% TDG 100% mortality in 4 days	10-day bioassays conducted in a 3.2 m deep tank. Fish were held in 20 cm deep cages within the tank at depths representing TDG supersaturation of 100% to 128%.	North America	River (laboratory bioassay)	(Fickeisen and Montgomery 1978)
Cutthroat trout (<i>Oncorhynchus clarkii</i>)	LC 50 128% TDG in 2,2 days Ca. 115 % TDG 14 days	Tank depth 0,6 m	North America	River (laboratory bioassay)	(Fickeisen and Montgomery 1978)
Atlantic salmon (<i>Salmo salar</i>)	160% O ₂ saturation - first subcutaneous bubbles occurred after 14 days 190% O ₂ saturation - 50% and at 220% O ₂ saturation 77% had gas bubbles on major part of the body after 16 days 190% O ₂ saturation After 3 three weeks reduced swimming capacity 110% O ₂ saturation Turned more after one week compared to control group	Juvenile Atlantic salmon have been exposed to water supersaturated with oxygen in two groups (low oxygen group with 110%, 140% and 190% and high oxygen group with 130%, 160% and 220%). No TDG measures conducted	Norway	Aquaculture	(Espmark, Hjelde and Baeverfjord 2010)

Mountain whitefish (<i>Prosopium williamsoni</i>)	LC₅₀ = 128% TDG 100% mortality in 1 day 124% TDG 100% mortality in 2 days 120% TDG 100% mortality in 4 days	10-day bioassays conducted in a 3.2 m deep tank. Fish were held in 20 cm deep cages within the tank at depths representing TDG supersaturation of 100% to 128%.	North America	River (laboratory bioassay)	(Fickeisen and Montgomery 1978)
--	--	---	---------------	-----------------------------	---------------------------------

Cypriniformes Species	Threshold levels LC ₅₀ , LT ₅₀	Summary	Region	Environment	Reference
Speckled Dace (<i>Rhinichthys osculus</i>)	LC₅₀ = 140% TDG - 96h	Speckled dace and juvenile Cutthroat trout have been exposed to TDG levels from 110% - 142%.	North America	River (laboratory bioassay)	(Nebeker, Hauck, Baker and Weitz 1980)
Largescale sucker (<i>Catostomus macrocheilus</i>)	LC₁₀₀ = 124% TDG 100% mortality in 6 days LC₈₀ = 120% TDG 80% mortality in 10 days	10-day bioassays conducted in a 3.2 m deep tank. Fish were held in 20 cm deep cages within the tank at depths representing TDG supersaturation of 100% to 128%.	North America	River (laboratory bioassay)	(Fickeisen and Montgomery 1978)
Northern pikeminnow (<i>Ptychocheilus oregonensis</i>)	LT₅₀ = 125% - 15.3h 130% - 10.5h	Five fish species, resident to Rufus Woods Lake, have been tested on tolerance to total dissolved gas (TDG) levels of 115%, 125% and 130%.	North America	River (laboratory bioassays)	(Beeman et al. 2003)
Norther pikeminnow (<i>Ptychocheilus oregonensis</i>)	≤110% TDG - 0% mortality LC_{32/100} = 117% TDG - 32% mortality in 12 days 126% TDG - 100% mortality in 20h	Northern pike minnow was exposed to gas levels from 100-126% in laboratory bioassays.	North America	River (laboratory bioassay)	(Bentley and Dawley 1981)
Chinese sucker (<i>Myxocyprinus asiaticus</i>)	LC₅₀ 125% TDG - 12.4h 127% TDG - 10h 129% TDG - 8h 130% TDG - 7.4h 133% TDG - 6h 135% TDG - 4.6h 140% TDG - 3.9h 145% TDG - 3h	Assessment of effects of TDG supersaturated water on the Chinese sucker in the laboratory. TDGS levels of 145%, 140%, 135%, 130%, 125%, 120% and 100% were tested. Conducted intermittent exposure, vertical and horizontal avoidance experiments.	China	River (laboratory bioassay)	(Cao, Li, et al. 2016)
Chinese sucker (<i>Myxocyprinus asiaticus</i>)	LC₅₀ 125% TDG - 43.4h 130% TDG - 9.2h 135% TDG - 7.8h 140% TDG - 4.7h 145% TDG - 3.2h	Chinese sucker were exposed to supersaturated water at levels from 120% - 145% for 48h. Determined LC ₅₀ and LT ₅₀	China	River (laboratory bioassay)	(Chen, et al. 2012)
Largescale sucker (<i>C. macrocheilus</i>)	Largescale sucker 125% - 17h 130% - 9.5h	Five fish species, resident to Rufus Woods Lake, have been tested on tolerance to total dissolved gas (TDG) levels of 115%, 125% and 130%.	North America	River (laboratory bioassays)	(Beeman, et al. 2003)
Longnose sucker (<i>C. catostomus</i>)	Longnose sucker 125% - 56h 130% - 30h	Five fish species, resident to Rufus Woods Lake, have been tested on tolerance to total dissolved gas (TDG) levels of 115%, 125% and 130%.	North America	River (laboratory bioassays)	(Beeman, et al. 2003)
Redside shiner (<i>Richardsonius balteatus</i>)	Redside shiner 125% - 116h 130% - 31h	Five fish species, resident to Rufus Woods Lake, have been tested on tolerance to total dissolved gas (TDG) levels of 115%, 125% and 130%.	North America	River (laboratory bioassays)	(Beeman et al. 2003)
Rock carp (<i>Procypris rabaudi</i>)	120% - TDG 18.7h 125% - TDG 15.4h 130% - TDG 8.2h 135% - TDG 6.6h 140% - TDG 3.5h 145% - TDG 1.7h	Effects of TDG on acute lethality and avoidance response have been tested in juvenile rock carp. (105%, 115%, 120%, 125%, 130%, 135%, 140% and 145%) Depth: 0.20m	China	River (laboratory bioassay)	(Huang, et al. 2010)
Rock carp (<i>Procypris rabaudi</i>)	after preexposure 120% TDG - 10.4h 125% TDG - 4.6h 130% TDG - 3.2h 135% TDG - 2.1h 140% TDG - 1.4h 145% TDG - 1.4h	Rock carp (<i>Procypris rabaudi</i>) have been pre-exposed to a saturation level of 130% for 2.33h. Surviving fish had a recovery time for 5d in saturated-equilibrium (100% TDG) water. Afterwards fish were exposed TDGS levels of 120%, 125%, 130%, 135%, 140% and 145%.	China	River (laboratory bioassay)	(Wang, Liang, Tuo, Li and Hodges 2015)
Silver Carp (<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)	LC₅₀ 137.47% TDG - 12h 130.91% TDG - 24h	Influence of TDG levels from 110-140% on silver carp have been tested. Some silver carp	China	River (laboratory bioassay)	(Cao, Liang, et al. 2016)

	126.11% TDG - 48h 122.96% TDG - 72h LT₅₀ 140% TDG - 5.6h 135% TDG - 11.22h 130% TDG - 28.84h 125% TDG - 67.71h	died when TDG level exceeded 120%, fish which were exposed to 140% TDG died within 10h.			
Carp (<i>Cyprinus carpio</i>)	LC50 122% TDG - 96h	Tolerance and response to supersaturated water of carp and black bullhead have been tested.	Europe & North America	Aquaculture (laboratory bioassay)	(Gray, et al. 1982)

Siluriformes Species	Threshold levels LC ₅₀ , LT ₅₀	Summary	Region	Environment	Reference
Black bullhead (<i>Ictalurus melas</i>)	LC50 114% TDG - 96h	Tolerance and response to supersaturated water of Carp and Black bullhead have been tested.	Europe & North America	Aquaculture (laboratory bioassay)	(Gray, Page, Saroglia and Bronzi 1982)
Channel catfish (<i>Ictalurus punctatus</i>)	115.4% TDG - 54% mortality in 35 days 110.0% TDG - 1% mortality in 35 days (clinical sign of GBD) 104.7% TDG - 0% mortality in 35 days (no clinical signs)	Juvenile channel catfish was exposed to supersaturated water for 35 days at three levels, low (104.7%), medium (110.0%) and high (115.4%) TDG	North America	River (laboratory bioassay)	(Colt, et al. 1985)

Perciformes Species	Threshold levels LC ₅₀ , LT ₅₀	Summary	Region	Environment	Reference
Walleye (<i>Sander vitreus</i>)	LT50 125% - 169h 130% - 62h	Tolerance to total dissolved gas (TDG) at 115%, 125% and 130% were tested	North America	River (laboratory bioassays)	(Beeman et al. 2003)
Sea Bass (<i>Dicentrarchus labrax</i>)	Max. level of TDG at 0% mortality Post larval: 120% TDG Fingerling: 115% TDG LC50 Post larval: 127.2% TDG - 96h Fingerling: 116% TDG - 96h	Tolerance of two marine fish species to gas supersaturated water	Europe	Aquaculture	(Gray, et al. 1985)
White seabass (<i>Atractoscion nobilis</i>)	0% Mortality at TGP of 98%, 102% or 109% At 122% TGP mortality increased 5 percentage points (enough information)	Cultured juvenile white seabass were exposed to TGP levels between 98% and 122%.	North America	Aquaculture	(Smiley, et al. 2011)

Mugiliformes Species	Threshold levels LC ₅₀ , LT ₅₀	Summary	Region	Environment	Reference
Striped Mullet (<i>Mugil cephalus</i>)	Max. level of TDG at 0% mortality Post larval: 119% TDG Fingerling: 115% TDG LC50 Post larval: 129.4% TDG - 96h Fingerling: 124.8% TDG - 96h	Tolerance of two marine fish species to gas supersaturated water	Europe	Aquaculture	(Gray, Saroglia and Scarano 1985)

Acipenseriformes Species	Threshold levels LC ₅₀ , LT ₅₀	Summary	Region	Environment	Reference
White sturgeon (<i>Acipenser transmontanus</i>)	118% TDG - 0% mortality in 10 days but clinical signs of GBD 131% TDG - 50% mortality in 13 days	Larvae of white sturgeon where exposed to supersaturated gas levels of 118% and 131% TDG	North America	River (laboratory bioassay)	(Counihan, et al. 1998)

Scorpaeniformes Species	Threshold levels LC ₅₀ , LT ₅₀	Summary	Region	Environment	Reference
Torrent sculpins (<i>Cottus rothens</i>)	128% TDG 50% mortality in 10 days 120% TDG 30% mortality in 10 days	10-day bioassays conducted in a 3.2 m deep tank. Fish were held in 20 cm deep cages within the tank at depths representing TDG supersaturation of 100% to 128%.	North America	River (laboratory bioassay)	(Fickeisen and Montgomery 1978)

Amphibians

Species	Threshold levels LC ₅₀ , LT ₅₀	Summary	Region	Environment	Reference
American Bullfrog (<i>Rana catesbeiana</i>)	132.9% TGP – 40% Mortality in one day 116.8% TGP 0% mortality for 4 days – but lead to floating 108.8% for 27 days no clinical signs	Adult bullfrogs, were exposed to supersaturated water at 132.9%, 116.8% and 108.8% TGP	North America	River (laboratory bioassay)	(Colt, Orwicz and Brooks 1987)

Invertebrates

Species	Threshold levels LC ₅₀ , LT ₅₀	Summary	Region	Environment	Reference
<i>Daphnia magna</i> <i>Pacificus leniusculus</i> <i>Acronuria californica</i> <i>Acronuria Pacifica</i> <i>Pteronarcys californica</i>	LC₅₀ Daphnia magna 122.5% TDG - 96h 120% TDG - 7d 117.5% TDG - 10d Lethal threshold 111%TDG Pacificus leniusculus 147% TDG - 96h 145% TDG - 7d 133% TDG - 10d Lethal threshold 127% TDG EC₅₀ Acronuria californica 135% TDG - 10d Acronuria Pacifica 125% TDG - 10d Pteronarcys californica 125% TDG - 10d		North America	River (laboratory bioassay)	(Nebeker 1976)
Mayfly (<i>Timpanoga Hecuba pacifica</i>) Caddisfly (<i>Dicosmoecus gihvipes</i>) Midge (<i>Cricotopus sp.</i>) Mosquito (<i>Culex pens</i>)	Mayfly (LC₅₀) 128.9% - 96h Caddisfly (TM₅₀) 149.5% - 10d 134.2% - 45d Midge & Mosquito No correlation between gas concentration and mortality	The effects of air-supersaturated water on four benthic invertebrate species have been tested.	North America	River (laboratory bioassays)	(Nebeker, Baker and Weitz 1981)

4 Årsak til gassovermetning

I kapittel 2.1 er det beskrevet hvordan gassovermetning oppstår. I det følgende oppsummeres årsakene som har ført til menneskeskapt gassovermetning i Norge.

4.1 Luftinndrag ved demninger

Demninger og da særlig vannslipp i flomluker, men også sluseanlegg for skipstrafikk, er kjent for å kunne føre til kunstig gassovermetning ved elvekraftverk i store elver i USA, Canada og Kina (Beiningen and Ebel (1970b); (Ebel and Raymond 1976; Jiang et al. 2008; Weitkamp and Katz 1980). Luft blir dratt med under vann når store vannmengder renner over demningen eller flomluker, og luften løses i flere meter dypt vann i elven nedenfor demningen. Situasjonen er beskrevet for store elver med over 1000 m³/s vannføring, men i prinsippet kan det også skje ved mindre elver avhengig av vanddyp og omfang av luftinndrag.

4.2 Luftinndrag i bekkeinntak til vannkraftverk

Denne årsaken er bare kjent fra Norge og skjer i vannkraftverk med bekkeinntak. Årsaken er detaljert beskrevet i (Stokkebø et al. 1986) og i Figur 34. Noen bekkeinntak kan rive med luft når vannføringen blir for stor. Årsaken er at slike bekkeinntak og da særlig sjaktene er underdimensjonert i forhold til vannføringen. Luften dras ned i kraftverkstunellen der luften løses under hydrostatisk trykk før turbinpassasjen. I kraftverk med Francisturbiner fører dette ofte til miljøskadelig gassovermetning (kap. 2.2).

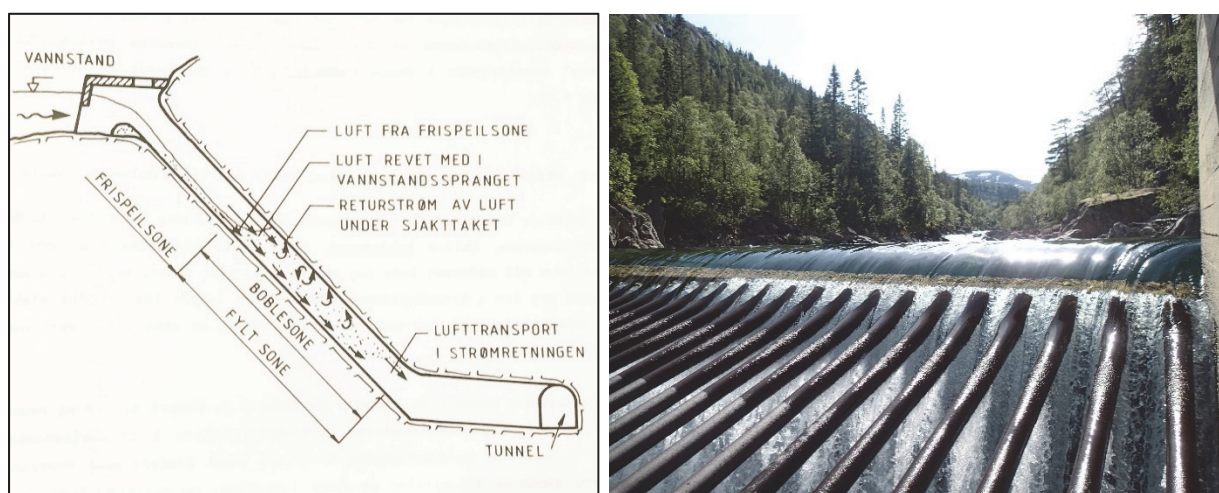


Fig. 34 Luftinndrag i bekkeinntak etter (Stokkebø et al. 1986) (venstre bilde) og bekkeinntak til brokk kraftverk i Otravassdraget (høyre).

4.3 Lufting av turbiner

Fra før var det kjent et eksempel at regulær lufting av Kaplan-turbiner førte til miljøskadelige nivåer av gassovermetning (Macdonald and Hyatt 1973a). Dataene fra Hellandsfoss kraftverk (kap. 2.3.7, Fig. 7) viser for første gang at også lufting av Francisturbiner kan føre til gassovermetningsnivåer som er relevant for

miljøet. Lufting av Francisturbiner er ikke uvanlig og brukes til å avlaste turbinen i visse driftssituasjoner. Dette kan altså være relevant for mange kraftverk, men omfang og varighet vil variere.

4.4 Luftinndrag ved tilstopping av inntaksrist

Eksemplene i Matreelva og Ekso (kap 2.3.6 og 2.3.10) viser at korte, uønskede og uforutsette tilstoppingsepisoder kan føre til luftinndrag ved dykkete inntak og som ikke fører til overmetning ved vanlig drift. Begge episodene resulterte i fiskedød grunnet grassblæresyke. Siden varigheten av slike overmetningsepisoder er korte og sjeldne er de vanskelig å oppdage uten varighetsovervåking. Slike kraftverkskonstruksjoner er utbredt, og med kort varighet av overmetningsepisodene kan episoder forekomme langt oftere enn antatt i Norge.

4.5 Luftinndrag i overflateinntak og omløpstuneller

Også magasininntak kan føre til gassovermetning dersom de er bygget for nær overflaten og river med seg luft. Et eksempel for dette var Kjela kraftverk (Telemark). I Rygene kraftverk ble luft tilført fra en omløpstunnel. I begge tilfeller ble det registrert høy gassovermetning med blakking av vann.

4.6 Luftinndrag i utløpskanaler

Gassovermetning som ble målt i kraftverkene ved Evanger og Mel (kap. 2.3.9 og 2.3.4) har mest sannsynlig oppstått etter passasjen gjennom Pelton-turbinen ved at luftbobler løses i trange og dype utløpskanaler. Verdiene var lave til moderate, men det kan ikke utelukkes at høyere overmetning kan oppstå ved luftinnblanding i større kraftverk med dypere kanaler. En liten økning i gassmetning (1-4 %) oppstår ved drift i de fleste kraftverk uavhengig av turbintype. Også i slike tilfeller løses luften i utløpskanalene, men nåvåene er lave og betraktes vanligvis ikke som miljøskadelige.

5 Overvåking – hvor, når og hvordan?

Siden gassovermetningbølger ofte er periodisk og siden det er vanskelig å oppdage effekter på fisk og bunndyr uten målrettede undersøkelser, har gassovermetning ofte forblitt uoppdaget. Allerede i 1984 ble det anbefalt å kartlegge problematikken utover de i sin tid kjente tilfeller (Blindheim et al. 1984). Dette ble i liten grad fulgt opp - med noen unntak i kraftverk til BKK, AE/Otra kraft, SFE, Statkraft og Troms kraft.

Gassovermetning kan unngås ved hjelp av konstruksjonsmessige tiltak, både i eksisterende kraftverk og enda enklere i nye kraftverk som kan designes slik at gassovermetning unngås (se kap. nedenfor). Uønskete miljøeffekter kan altså reduseres og forhindres helt, uten at fornyerbar kraftproduksjon fra vannkraft reduseres, bortsett fra eventuelle kraftverksstopp under ombygging. Mindre luftinndrag vil dessuten føre til mindre skader som utblåsinger. Dette står i kontrast til andre miljøtiltak i vannkraftverk som for eksempel vannslipp som ofte reduserer muligheter til kraftproduksjon og vil være relativt kostbar.

Tiltak forutsetter at man kjenner forekomst og omfang av gassovermetning. Dette tilsier at det er nødvendig med systematisk overvåking. Flere eksempler i kap 3. har vist at uten systematisk overvåking kan gassovermetning forbli uoppdaget over mange tiår, selv om det forekommer blakkingsperioder, reduserte fisketettheter eller fiskedød. Innsats til en slik gassmetningsovervåking kan sammenlignes med overvåking av vannføring og temperatur nedenfor kraftverk og bør gjennomføres standardmessig i alle kraftverk med risiko til miljøskadelig gassovermetning dersom problematikken skal kunne løses.

5.1 Metode

Gassovermetning i vann kan måles ved hjelp av et Weiss saturometer permeable slange for gasser, og som er tilkoblet et manometer. Det måles vanligvis gassmetning relativ til vannoverflaten (TDG) ved å relatere gasstrykkmåling i saturometeret under vann til gasstrykk i luften ved vannoverflaten. Nitrogen beregnes dersom man har målinger av O₂, CO₂ og temperatur (Colt 1983).

I dag finnes det saturometer fra flere produsenter. Håndlogging kan gi et førsteinntrykk, men TDG kan endres raskt, noe som tilsier at en varighetslogger er nødvendig for å identifisere topper og kritiske nivåer. En logger i en elv må være mer robust enn standardloggerne som er tenkt for innendørsbruk i klekkerier. I en elv må saturometeret tåle flommer, is, frost, sedimenttransport, samt trykkforskjeller og kondens i måleslanger (Pulg, Vollset, et al. 2016). Siden det ikke fantes loggere som var robuste nok til helårsbruk i elver, har vi videreutviklet en logger til Fisch & Wassertechnik (GhPa 500) til «Norway 3.x.», bl.a. med mer robust måleslange for å unngå effekter av kondens og skader, samt et mer robust lednings- og beskyttelsessystem og GSM-dataoverføring i Norge. Saturometerslanger må byttes etter behov, vanligvis etter 1-2 år. Med slike loggere har vi hatt pålitelige flerårsmålinger også under ekstreme forhold (opptil 200-årsflom i Vossosystemet).

Måling av gassovermetning krever fagkunnskap ved måling i elver, særlig ved valg av målested. Gassovermetning kan lett undervurderes dersom målestedet er for grunt eller har for lite strøm. Bare et beskyttelsesrør med for få eller for små hull kan resultere i feilaktig lave måleverdier, hvis vannutveksling er for liten. Det kan også dannes bobler i gassovermettet vann som kan ha effekt på målingen. Derfor anbefales å måle dypt nok (også avhengig av vannet man vil måle) og med tilstrekkelige strømforhold, gjerne > 0,4 m/s. Vanligvis anbefales logging i minst ett år for å kunne inkludere eventuelle toppverdier i årssyklusen. Erfaringer med langtidsovervåking (kap. 3) har vist at gassovermetningsbølger ofte forekommer i visse årstider eller knyttet til flom og vårløsning. Andre gassbølger er knyttet til spesielle driftssituasjoner og kan forekomme daglig sammen med effektkjøring (saturopeaking) eller med flere års mellomrom. For å fange opp disse må det logges kontinuerlig i kraftutløpet. Eksempelene i Matreelva og Ekso med sjeldne og kortvarige episoder som har ført til akutt gassblæresyke viser at slike kraftverk bør ha en pågående varighetsovervåking av gassmetning dersom denne miljøfaktoren skal kunne oppdages og reduseres.



Fig. 35 Varighetsvervåking av gassovermetning i elver er mulig med robuste saturometer. Målestedet må sikre nok vannstrøm og vandyp og monteringen må tåle flommer, sedimenttransport og is.

5.2 Kraftverkstyper og risiko for gassovermetning

Det er ikke alle kraftverk som har like høy risiko for miljøskadelig gassovermetning. Det vil ofte være lav risiko dersom bekkeinntak er tilstrekkelig dimensjonerte eller utformet som vakuuminntak, ved dykkete inntak i magasiner og ved bruk av Pelton turbiner. Følgende kraftverkstyper har større risiko for gassovermetning og bør overvåkes, dersom gassovermetning som miljøfaktor skal kunne kartlegges og reduseres:

- Kraftverk med bekkeinntak og Francisturbiner eller Kaplanturbiner
- Kraftverk med lufting i Francis- og Kaplanturbiner
- Damanlegg og flomluker ved store og dype elver ($Q > 1000 \text{ m}^3/\text{s}$, dyp $> 5 \text{ m}$)
- Kraftverk med fare for riststopping (mangel av automatisk eller underdimensjonert ristrenser)
- Kraftverk med fare for luftinndrag i inntak, tunnelsystemet eller utløpskanal, også ved Pelton turbiner.
- Kraftanlegg med luftfylte deler som del av driftssystemet (f. eks. luftpute-kammer, turbiner på «roternde reserve»)

5.3 Indikasjoner for gassovermetning i elver

Følgende tegn kan indikere gassovermetning i elver:

- Blakking og brusing av vann (hvitaktig farge som forsvinner etter hvert, dannes av mange små bobler som kan bruse), se Fig. 36. Gassovermetning kan også være usynlig særlig ved nivåer under 130% til 140 %.
- Fiskedød med tegn på akutt gassblæresyke er direkte synlig i form av bobler under huden i finnene, se kap. 3.1 og 3.2). Slike kliniske tegn på gassblæresyke kan imidlertid forsvinne fort hos død fisk eller etter at overmetningen er over.
- Gassblæresyke - små bobler i under huden i finner, hoderegionen og «froskeøyne» (eksoftalmus, se kap. 3.1 og 3.2) med sekundæreffekter som finneråte og soppinfeksjoner (Fig. 4)
- Oppdrift av småpartikler – små bobler kan feste seg til død og levende materiale som begynner å flyte og kan danne en slags skum ved overflaten.
- Relativ lave tettheter av fisk og bunndyr nedenfor potensielle kilder (som ved annen forurensing)



Fig. 36 Bildet viser overmettet og blakket vann i Otra ved utløp Brokke kraftverk (28.05.2014). Vannet fra restfeltet er ikke overmettet (100 % metning) og er klart og mørkt mens vannet fra kraftverket er overmettet (166 % TGP) og blakket (gråhvitt). Blakkingen oppstår på grunn av mange små bobler – luft på vei ut av vannet. Kraftverket ble satt i drift 1965. Gassovermetning ble påvist etter målinger 2011. (Foto: Ulrich Pulg)

6 Tiltak for å unngå eller redusere gassovermetning

I moderne vannkraftkonsesjoner stilles som regel krav om at risiko for gassovermetning skal være «minst mulig» og at det kan pålegges tiltak for «å forhindre eller redusere problemene» (OED 2004, Meddelte vassdragskonsesjoner, www.statsbudsjettet.no/Upload/Statsbudsjett_2006/dokumenter/pdf/vedlegg/vassdrag.pdf). Gassovermetning som miljøfaktor kan unngås ved å utforme og dimensjonere nye kraftverk tilstrekkelig, tilpasse drift inkl. lufting av turbiner eller ved riktig design av flomluker og inntak. Ved eksisterende kraftverk kan gassovermetning reduseres ved en rekke tiltak, deriblant rensing av varegrind, vakuuminntak, driftstilpasning, lufting eller regulering av bekkeinntak. I det følgende sammenfattes metoder for å unngå eller redusere gassovermetning i elver. Disse er delt i å unngå luftinnblanding og å lufte overmettet vann.

6.1 Unngå luftinnblanding

For å unngå gassovermetning bør hovedprinsippet være å hindre innblanding av luft der vannet settes under trykk. Har overmetningen først oppstått og vannet sluppet ut i vassdraget, er det vanskelig å bli kvitt den før den har rammet deler av vassdraget. Dessuten er innblandet luft ofte ikke ønskelig for selve kraftverksanlegget. Den kan bl. a. føre til utblåsninger og økt slitasje på turbiner, luker og ventiler (Stokkebo et al. 1986). Med tilstrekkelig dimensjonering av bekkeinntak, dykkete magasininntak, samt rene inntaksrister (tilstrekkelig dimensjonerte ristrensker) kan risikoen for innsuging av luft minimeres. Aktiv bruk av luft i kraftverkssystemet, for eksempel ved drift av visse Francisturbiner, dempingsrom («luftputekammer») eller turbiner på tomgang i luftet turbinhus («roterende reserve»), bør avveies mot potensialet for gassovermetning. Kunstig rask oppvarming av vann, for eksempel ved utslipp av relativt sett varmt eller kaldt vann, bør unngås.

6.1.1 Ristrenser, trykk- og gasslogger med alarmsystem

I eksisterende kraftverk (f.eks. i Ekso og Matreelva) har det blitt etterinstallert nye/oppgraderte ristrensere med tilkoblet alarm. Alarmen varsler ved for stor trykkforskjell ved varegrind (nivå ovenfor-nedenfor inntaksrist) og ved gassovermetning i kraftverksutløp (Ekso). I Ekso er systemet supplert med en gasslogger med alarmsystem. Ristrensere har redusert gassmetningen til under 110 % i de elvene, men det foreligger bare korte overvåkingsperioder (< 1 år).

Systemet må ferdigevalueres, men prinsippet med kombinert trykk- og gassmåler tilkoblet alarm er lovende for kraftverk der tilstopping av rist er årsak til luftinndrag. Det er lett å installeres også ved eksisterende anlegg og når alarmen går kan kraftverkdrift reduseres raskt. Med dette kan gassovermetning forhindres eller begrenses til få minutter, noe som kan være nok til å unngå miljøeffekter (se kap. 3.5.2).

6.1.2 Regulering av bekkeinntak

I Modalselva har man stengt bekkeinntakene som rev med luft ved flom. Dette reduserte overmetningen i flomsituasjoner til under 110 % (fra maks. 168 %). Fortsatt finnes gassovermetningsperioder grunnet lufting av turbin.

6.1.3 Vakuuminntak

I Driva har det blitt etterinstallert vakuuminntak. Dette sørger for at luften fortrenses fra inntakssjakten etter hvert ved høy vannføring og med dette reduseres overmetning etter en overgangsfase (minutter til timer). En nærmere beskrivelse finnes i kap. 2 (Blindheim et al. 1984) og (Berg 1992). Det er kostbart å etterinstallere vakuuminntak, spesielt i krevende terreng. Dessuten fjernes ikke gassovermetningen helt ved bruk av vakuuminntak. I en overgangsfase vil luft kunne løses.

6.2 Lufting av overmettet vann

6.2.1 Peltonturbiner

Bruk av Peltonturbiner over fritt vannspeil luffer vannet så pass godt at det er lav risiko for negative miljøeffekter. I utløpskanalen bør man i midlertid være klar over at luft kan innblandes og føre til langvarig eller periodisk overmetning og moderat risiko for negative miljøeffekter (kap. 2). Utløpstunneler som er bred og grunn vil løse mindre luft enn tunneler som er smale og dype.

6.2.2 Lufting av vann i elv og over terskler

Utlufting av gassovermettet vann i elver kan foregå over mange kilometer før miljørisikoen reduseres til lav risiko. Det er likevel mulig å fremskynde utluftingen. (Pulg et al. 2018b) har observert at vanddropp over terskler (1-5 m) kan redusere gassmetningen med 40 %. En tilsvarende lufting testes for tiden ved Tjurrmoen dam i Otra. Første testresultater indikerer at gassovermetning blir redusert med 63-75 %. Det ble det satt opp en modell for utlufting ved fritt fall over terskler (s.n.). Dette arbeidet er ikke avsluttet og modellen for fritt fall er basert på få målinger. I et pågående arbeid skal modellen presiseres og videreutvikles.

Utlufting i elv har blitt analysert for Otra nedenfor Brøkke (Pulg et al. 2018b), der det fantes flere år med måledata fra flere stasjoner nedstrøms elven. Det ble funnet en eksponentiell nedgangsfunksjon som beskriver utlufting avhengig av transportlengde og skjærspenning.

Utlufting i elv (Otra):

$$G_{km} = 100 + (G_0 - 100)e^{-(0.0271997 + 0.0077792 \times \text{Shearstress}) \times \text{delta L}}$$

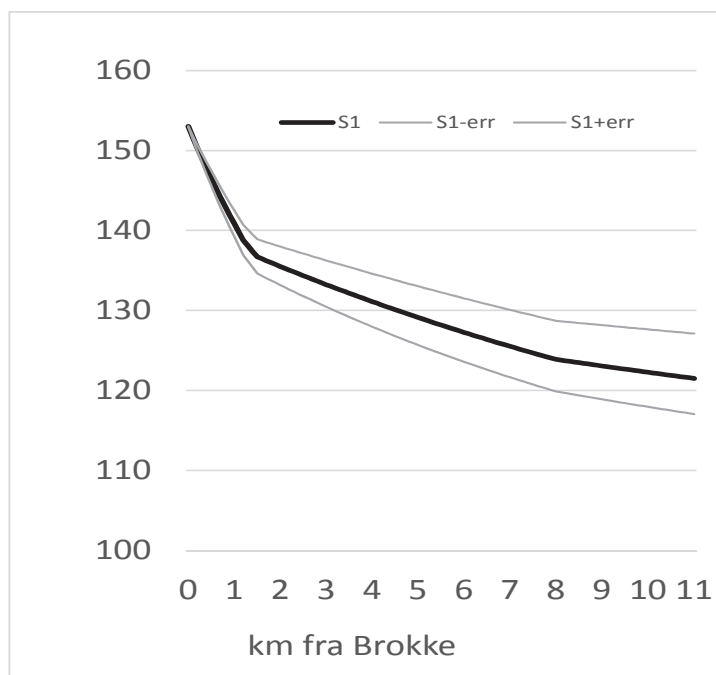
G_{km} :	Gassmetning et sted i elva nedenfor kilden i %
G_0 :	Gassmetning ved kilden i %
e :	Eulers tall
shearstress :	gjennomsnittlig skjærspenning i strekning delta L
delta L:	lengde strekning mellom G_0 og G_{km}

Utlufting ved fritt fall (1-5 m, terskler/deflektor. preliminært modell fra pågående prosjekt):

$$G_e = 100 + (G_0 - 100) * 0,6^n$$

G_0 :	Utgangsgassmetning i %
G_e :	Gassmetning etter droppene i %
n:	Antall dropp

Fig. 37 Modell for utgassing i Otra med standardfeil ved 153 % TDG fra Brokke og transport 11 km nedstrøms. Standardfeil ved Dam Tjurrmoen (11 km) er +5,6 % og -4,4 %. Y-akse TDG i %, x-akse km fra Brokke kraftverk.



Stor kontaktflate mellom luft og vann ved lavest mulig trykk, høy temperatur, mye turbulens og relativ høy gastykkforskjell mellom vann og luft bidrar til økt lufting. I elver skjer dette i grunne partier med stryk, fossefall, høy gradient, mye turbulens og stor ruhet i elvebunn. Skjærspenning ble vurdert som den beste indikator for utlufting i Otra nedenfor Brokke (Pulg et al. 2018a). Med denne modellen ble effekter av forskjellige tiltak til økt utlufting i elven beregnet. Både utlegg av store stein (1-2 m, økt ruhet), terskler med fritt fall og en deflektor i et vannslipp i en dam ville øke utluftingen. Modellen tyder på størst effekt av terskel med fritt fall og deflektor i vannstrålen i dam Tjurrmo (Fig. 38 & Fig. 39). Deflektoren ble installert av AE/Otra kraft i samarbeid med Uni Miljø LFI i oktober 2018 (Fig. 41). Første målinger bekrefter modellen ovenfor. Gassovermetning ble redusert med 63 %. Det er imidlertid for tidlig å konkludere og det planlegges ett år med overvåking.

Lufting ved å tilføre/ pumpe inn i luft i overmettet vann kan bidra til utlufting dersom omgivelsestrykk og hydrostatisk trykk er lav nok. Lufting av turbiner (se kap. 2.3) kan bidra å øke eller redusere gassmetning, avhengig av utgangsmetning og omgivelsestrykk. Lufting kan med dette brukes til avbøtende tiltak der rammebetingelsene er egnet. Luftinnblanding under relativt høyt trykk kan som kjent føre til gassovermetning når trykket reduseres. Dette skjer ved luftinnblanding i dype elvepartier ved flommer, gjerne i fossekulper eller i trange og relativ bratte elveløp (gradient > 0,005, se kap. 2.3).

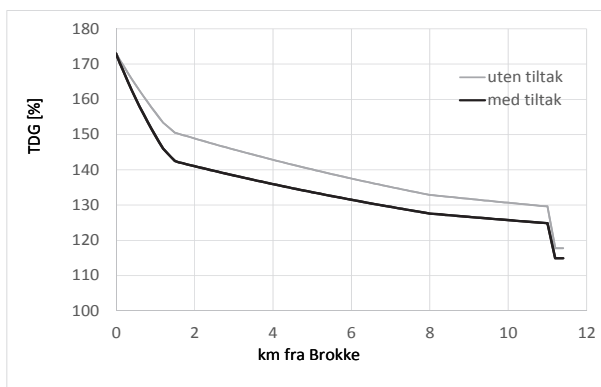


Fig. 38 Modellert effekt av steinutlegg nedenfor Brokke kraftverk.

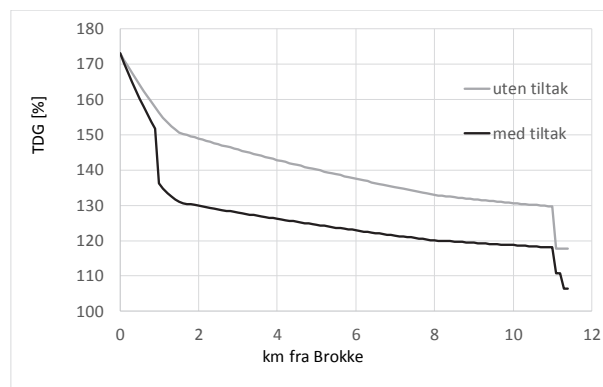


Fig. 39 Modellert effekt av steinutlegg, terskel med fritt fall og deflektor i vannslipp i dammen.

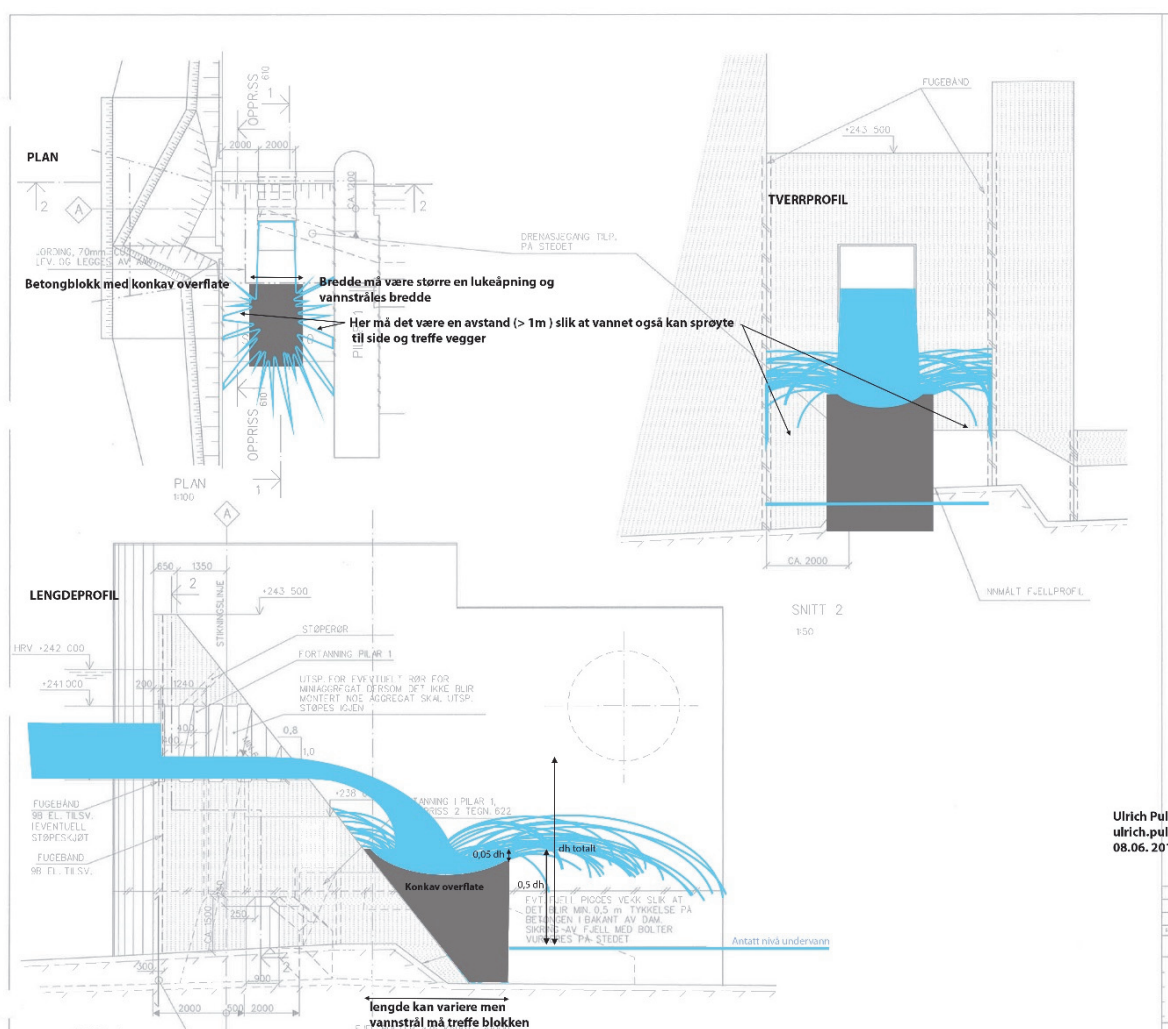


Fig. 40 Utforming av deflektor som foreslått av Uni Miljø LFI I juni 2018. AE/Otra Kraft har deretter prosjektert og montert en prototype som ble installert 4. 10. 2018.



Fig. 41 Deflektoren etter installasjon i dam Tjurmoen 2018, med og uten vann. Første testkjøring indikerer en reduksjon av gassovermetning med 63-75 %. (Foto S. Stranzl)

6.2.3 Injeksjon av luft

Med hjelp av kompressorer kan luft pumpes inn i vann, en teknikk som også brukes for å lufte eller omrøre eutrofe innsjøer. Luftboblene vil gjennom økt overflate og gradvis minkende trykk på vei oppover i vannsøylen vanligvis bidra til utlufning av overmettet vann. Dette har blitt modellert og anbefales som teoretisk mulighet men med henvisning om store luft- og energibehov som må tilsvare vannmengde (Zhang, Zhou, and Prosperetti 2017). Troms Kraft har prøvd å lufte gassovermettet vann i utløpet til Skibotn kraftverk ved hjelp av en kompressor som klarte 8 m³ luft per time, uten å kunne måle en nevneverdig reduksjon av gassmetning (Øyvind Steffenach, pers. med.). Det ble konkludert at mengde luft var for lite i forhold til vannføring.

Injeksjon av luft kan også føre til gassovermetning når mye av luften løses i stort dyp og i begrenset vannvolum og det ble dokumentert nitrogenovermetning i innsjøer som skulle oksygeniseres ved kunstig lufting (Fast and Hulquist 1982; Fast 1979). Det er nødvendig å vurdere trykk i omgivelse, område der gassene løses, gassammensetning, temperatur, luftmengde, oppholdstid, fortykning og vannvolum for å vurdere om lufting vil bidra til økning eller redusering av gassmetning.

6.2.4 Lufting av turbiner

Det er ikke uvanlig at Francisturbiner og noen Kaplanturbiner kan tilføres luft for å unngå for stor belastning i visse driftssituasjoner (Goyal and HGhandi 2018). Dette kan føre til gassovermetning, som eksempelet fra Modalselva viser (kap. 2.3.7, 110-120 % TDG) og her kan det ligge en årsak til overmetning i flere elver siden lufting av turbiner er utbredt. Ved høy nok utgangsmetning i vannet vil imidlertid lufting av turbinen også kunne bidra til en reduksjon av metningen dersom det tilføres nok luft og dersom den kan boble ut ved tilstrekkelig lavt trykk etter turbinpassasjen. Dette kan være en lovende metode å redusere gassovermetning der det finnes passende forhold og det anbefales å forske mer om dette, både i modeller og i kraftverk.

6.3 Fortykning og drift

Fortyning av gassovermettet vann med vann med lavere metning reduserer samlet gassovermetning. Måltrettet fortykning i store upåvirkete vassdrag eller blanding med mettet eller undermettet vann fra magasiner kan derfor bidra til å redusere eller unngå uønskete miljøeffekter. Også driftsmønster kan i noen tilfeller tilpasses. Beregninger fra Otra viser at en 8 km lang minstevannføringsstrekning ved Hekni kraftverk kan skjerme for de fleste gassovermetningsbølger ved å unngå kraftverksrevisjoner visse perioder av året skriver Pulg et al. (2016).

7 Status av kunnskap og forskningsbehov

Den foreliggende sammenstillingen av kunnskap om gassovermetning i vassdrag viser at det finnes en rekke begrensinger grunnet kunnskapsmangel. Dette gjelder særlig tåleevne til norske arter og omfang av gassovermetning i Norge og Europa. Denne kunnskapsmangelen fører til usikkerhet i håndtering av gassovermetning og dersom miljøskader skal unngås bør føre var prinsippet legges til grunn, dvs. tåleevnen til de sårbare artene og stadiene bør betraktes som grenseverdier.

Det mangler kunnskap om en rekke biologiske effekter av gassovermetning, først og fremst:

- Toleransenivå hos de fleste dyre- og plantearter deriblant nesten alle europeiske fiskearter,
- påvirkning på biologisk mangfold inklusivt økosystemfunksjoner,
- påvirkning på biologisk produksjon,
- og påvirkning på økosystemtjenester inkludert funksjonell diversitet hos artene som er tilstede.

Vi vet dessuten lite om omfanget av kunstig gassovermetning i Norge, Europa og i verden. Bare et fåtall elver eller kraftverk er undersøkt. Dessuten mangler kunnskap om tiltaksmetoder får å redusere gassovermetning i eksisterende kraftanlegg.

For å kunne skape en bedre oversikt, presenteres kunnskapsnivået- og behovet i tabeller med følgende kategorier

Tabell 16. **Kunnskapsnivå delt i kategorier:**

Svært godt	Godt	Moderat	Dårlig	Svært dårlig
Effekter kjent for hele livssyklus fra systematiske forsøk	Effekter kjent for de fleste stadier fra systematiske forsøk.	Effekter kjent for enkelte stadier fra systematiske forsøk.	Effekter bare kjent fra ikke systematiske forsøk eller feltobservasjoner.	Ingen direkte kunnskap. Effekter kan bare sannsynliggjøres ved å sammenligne med andre arter.
Fastsettelse av grenseverdi for alle stadier mulig	Fastsettelse av grenseverdi for disse mulig.	Fastsettelse av grenseverdi for disse mulig.	Fastsettelse av grenseverdi usikker.	Fastsettelse av grenseverdi meget usikker.

7.1 Biologisk tåleevne

Det er utført labforsøk for en rekke kinesiske og amerikanske fiskearter, særlig stillehavslaks. Det finnes langt mindre kunnskap om tåleevne til Atlantisk laks (to publiserte lab-studier med tilstrekkelig design, inkl. den foreliggende) og ingen systematiske studier om andre ferskvannsfisk i Norge. Det finnes heller ingen studier om norske eller europeiske invertebrater og amfibier, selv om noen få amerikanske studier og våre resultater i et pilotforsøk (Bateis rohdani) indikerer at gassovermetning kan føre til økt dødelighet (se Kap. 3.3). Det finnes få langtidsstudier som undersøker effekter av gassovermetning over flere måneder. Oss bekjent finnes bare en systematisk studie under kontrollerte forhold som går over et år (Krise 1993).

For å kunne beskytte arter, fastsette grenseverdier og kunne utføre målrettede avbøtende tiltak i Norge bør det utføres tåleforsøk for en rekke flere norske arter. Det foreslås å prioritere forsøkene med representanter fra forskjellige klasser og familier, dessuten bør verneverdi og økonomisk betydning vektlegges. Eksperimentelle laboratorieforsøk bør kobles med feltforsøk slik at resultatene kan være relevant for situasjonen i vassdrag.

Tabell 17. Kunnskapsnivå om norske arter og dyre- og plantegrupper i ferskvann.

Fisk	Toleransenivå lab.forsøk	Toleransenivå feltforsøk
Abbor	Svært dårlig	Svært dårlig
Arkitsk niøye	Svært dårlig	Svært dårlig
Asp	Svært dårlig	Svært dårlig
Bekkeniøye	Svært dårlig	Svært dårlig
Brasme	Svært dårlig	Svært dårlig
Elveniøye	Svært dårlig	Svært dårlig
Flire	Svært dårlig	Svært dårlig
Gjedde	Svært dårlig	Svært dårlig
Gjørs	Svært dårlig	Svært dårlig
Gullbust	Svært dårlig	Svært dårlig
Harr	Svært dårlig	Svært dårlig
Havniøye	Svært dårlig	Svært dårlig
Hork	Svært dårlig	Svært dårlig
Hornulke	Svært dårlig	Svært dårlig
Hvitfinnet steinulke	Svært dårlig	Svært dårlig
Krøkle	Svært dårlig	Svært dårlig
Lake	Svært dårlig	Svært dårlig
Laks	Moderat	Dårlig
Laue	Svært dårlig	Svært dårlig
Lagesild	Svært dårlig	Svært dårlig
Mort	Svært dårlig	Svært dårlig
Nipigget Stingsild	Svært dårlig	Svært dårlig
Regnlaue	Svært dårlig	Svært dårlig
Regnbueørret (innført)	Godt	Godt
Røye	Svært dårlig	Svært dårlig
Sik	Svært dårlig	Svært dårlig
Stam	Svært dårlig	Svært dårlig
Steinsmett	Svært dårlig	Svært dårlig
Sørv	Svært dårlig	Svært dårlig
Trepigget Stingsild	Svært dårlig	Svært dårlig
Vederbuk	Svært dårlig	Svært dårlig
Ørekyte	Svært dårlig	Svært dårlig
Ørret	Svært dårlig	Dårlig

Amfibier	Svært dårlig	Svært dårlig
Insekter	Svært dårlig	Svært dårlig
Krepsdyr	Svært dårlig	Svært dårlig
Fåbørstemark	Svært dårlig	Svært dårlig
Rundorm og flatorm	Svært dårlig	Svært dårlig
Mikroorganismer	Svært dårlig	Svært dårlig
Alger	Svært dårlig	Svært dårlig
Makrofytter	Svært dårlig	Svært dårlig

7.2 Biologisk mangfold og produksjon

Det er ingen studier som undersøker hvilken effekt gassovermetning har på biologisk mangfold eller biologisk produksjon i vassdrag (se Kap 3.3). Siden enkelte arter rammes må det gås ut i fra at både biologisk mangfold og produksjon blir rammet, særlig ved høye og langvarige gassovermetninger. Erfaringene i Otra indikerer at artsmangfold av bunndyr var redusert (kap. 3.3 og 2.3.1). Erfaringene i Otra, Matre og Ekso indikerer at utbredelse av fisk og tettheter kan være redusert og det er derfor sannsynlig at totalproduksjon av fisk kan reduseres (kap. 2.3.6 & 2.3.10). Også endret habitatbruk som unnvikning fra grunne områder vil kunne føre til mindre fiskeproduksjon.

Forskningsbehov

For å finne om og hvilken grad biologisk mangfold og produksjon rammes av gassovermetning trengs forskningsprosjekter som undersøker effekter i naturlige habitater og som kobler labordata mot forhold i naturen. Her bør man også sammenstille mulige effekter på økosystemets funksjon og økosystemtjenester for å kunne bedømme betydningen for økosystemet, mennesker og bruk av vassdrag.

7.3 Omfang av gassovermetning i norske vassdrag

Bare et fåtall kraftverk og elver i Norge har blitt overvåket med tanke på gassmetning. Samlet betraktes kunnskapsnivået som dårlig. En systematisk kartlegging av omfanget mangler i Norge - og store deler av verden. Vi har funnet kunstig gassovermetning i 6 av 9 elver i Norge, deriblant 2 med akutt fiskedød og ett med sannsynlig fiskedød. I tillegg har vi funnet publiserte opplysninger om 6 vassdrag, der det har blitt observert gassovermetning og gassblæresyke i fisk med akutt fiskedød.

At det ble funnet gassovermetning i 6 av 10 kraftverk betyr ikke at 60 % av landets kraftverk fører til overmetning. Siden kraftverk og logging ble valgt etter mistanke og indikasjoner om gassovermetning, er fenomenet trolig overrepresentert i utvalget. Likevel indikerer disse resultatene (kap. 2) at gassovermetning forekommer oftere enn forventet og at den lett kan bli oversett, særlig fordi den ofte ikke er synlig, kan forekomme periodisk og virke tynnende på fiskebestanden i begrensede områder og over tid. Ikke all fisk dør og døde fisk er vanskelig å finne under flomsituasjoner.

Tabell 17 angir kunnskapsnivå om gassovermetningens omfang i Norge. Kunnskapsnivået spriker mellom fylker.

Forskningsbehov

I strekninger som er utsatt for biologisk relevant gassovermetning vil det være vanskelig å nå god miljøtilstand etter vannforskriften og kvalitetsnormene for villaks. For å kunne bedømme omfanget av problemstillingen i Norge, bør det derfor settes i gang en systematisk kartlegging av kunstig gassovermetning. Det trengs ikke for alle kraftanlegg og demninger, men utsatte strekninger bør overvåkes. En prioritering kan skje etter grad av risiko vist i kap.5. Utover dette anbefales å varighetsovervåke kraftanlegg med risiko for gassovermetningsperioder på lik linje med vannførings- eller temperaturovervåking. På dette grunnlaget kan det settes i gang tiltak for å begrense og redusere relevant overmetning.

Tabell 18. Kunnskapsnivå omfang av gassovermetning i norske vassdrag

Fylke	Fiskedød grunnet gassblæresyke observert	Varighetsovervåking
Aust-Agder	Observerert i Otra og Nidelva, akutt fiskedød	Overvåket i enkelte elver: Deler av Nidelva, Otra ndf. Brokke
Vest-Agder	Ikke kjent	Ikke kjent
Akershus	Ikke kjent	Ikke kjent
Finnmark	Ikke kjent	Ikke kjent
Buskerud	Ikke kjent	Ikke kjent
Hedmark	Ikke kjent	Ikke kjent
Oppland	Ikke kjent	Ikke kjent
Oslo	Ikke kjent	Ikke kjent
Hordaland	Fiskedød observert i Matreelva og Ekso	Overvåket i 6 elver, Matreelva, Modalselva, Ekso, Vosso, Rasdals-elva, Hopselva
Møre og Romsdal	Enkelte vassdrag; Driva og Tafjord	Bare stikkprøver
Nordland	Ikke kjent	Ikke kjent
Rogaland	Ikke kjent	Ikke kjent
Sogn og Fjordane	Ikke kjent	To elver: Vetlefjordelva, Dalsdalselva
Telemark	Kjela kraftverk	Ikke kjent
Troms	Skibotnelva	Skibotnelva
Trøndelag	Ikke kjent	Ikke kjent
Vestfold	Ikke kjent	Ikke kjent
Østfold	Ikke kjent	Ikke kjent

7.4 Avbøtende tiltak

Avbøtende tiltak bør styres etter behovet og derfor er disse avhengig av kunnskap om biologi og omfang av gassovermetning (s.o.). Ved nye kraftanlegg kan gassovermetning unngås dersom anlegget utformes slik at den ikke river med seg luft i trykksjaktet, har tilstrekkelig dimensjonerte og ikke vertikale bekkeinntak (Stokkebø et al. 1986) med ristrenser (Pulg et al. 2018), samt bruk av peltonturbiner over fritt vannspeil. Tiltak forutsetter kunnskap og den vil bidra å kunne utforme nye kraftanlegg mer miljøvennlig.

Etter kunnskapsoppdateringen i Norge på 1980-tallet (Bekkeinntaksrapporten, se Stokkebø et al 1986), virker problemet redusert ved nybygging av kraftanlegg – uten at dette er ferdig vurdert. På verdensbasis er det imidlertid fortsatt store utbyggingsprosjekter der gassovermetning er oversett (Zarfl et al. 2015). I Kina finnes nå mange problemer knyttet til gassovermetning i elver fra relativt nye damanlegg (Feng et al. 2010).

I eksisterende kraftverk er det mer kostbart å gjennomføre endringer og her har det blitt brukt en rekke avbøtende tiltak. I Driva ble det utviklet et vakuuminntak (Stokkebø et al. 1986) (Berg, 1992) som reduserer overmetningen betydelig, men her trengs en overgangsfase fra noen minutter til timer inntil luften er fortrent. Stenging av bekkeinntak har blitt brukt i Modalselva og ny ristrensker ble innstallert i Matreelva. Begge

metoder reduserte gassovermetning (Pulg et al 2018), men er kostbare. Ikke minst er det kostbart å stenge inntak siden dette medfører tapt kraftproduksjon. Ombygging av eksisterende bekkeinntak er meget omfattende og kan fort komme over 100 millioner NOK, dersom det er flere inntak.

Dessverre er effekten av tiltak som er satt i gang ofte usikker siden gassmetningen som regel ikke ble overvåket lenge nok i etterkant. Ett unntak fra dette er kraftverkene i Modalselva og Ekso (BKK). Her ble det installert en varighetslogger. I andre vassdrag er det oss bekjent bare gjennomført stikkprøver etter tiltaket.

Forskningsbehov

For å kunne redusere gassovermetning i elver er det nødvendig å opprettholde og spre kunnskap om hvordan luftinndrag hindres /reguleres ved bygging av nye kraftanlegg. Ved eksisterende kraftverk trengs det en bedre overvåking av tiltak og effekt, dessuten en sammenstilling og kritisk gjennomgang av eksisterende kunnskap og metoder: Dette kan med fordel presenteres i en håndbok slik at kunnskapen kan formidles på en effektiv måte til forvaltning og industri.

Det trengs dessuten nye kostnadseffektive metoder som kan hindre luftinndrag eller lufte vann. Her trengs det ny forskning og vi anbefaler en tilnærming der problemstillingen belyses ved bruk av modellverktøy og deretter test av prototyper.

Tabell 19. Kunnskapsnivå avbøtende tiltak

Type tiltak	Funksjon	Overvåking
Vakuuminntak	Driva, fungerer etter en overgangsfase, korte gassmetningstopper kan fortsatt forekomme, dyrt å etterinstallere	Stikkprøver, ikke varighetsovervåking (> 1 år)
Ny/oppgradert ristrensker med trykk- og gassmåler og alarm	Matreelva, Ekso fungerer så vidt testet	Overvåket et halvt år ikke langtidsovervåket (> 1 år)
Stenging av bekkeinntak	Modalselva, fungerer så vidt testet. Krafttap, dyrt	Overvåket > 1 år
Lufting av overmettet vann i elver	Fortsatt lite data, utprøves i Otra	Modellevalueringer i litteratur.
Metoder som kan etterinstalleres ved bekkeinntak som luftkilde, er kostnadseffektive og ikke reduserer kraftproduksjon	Ikke kjent	Ikke kjent

8 Sammendrag

Denne publikasjonen sammenfatter internasjonal kunnskap om gassovermetning og dens miljøeffekter i vassdrag. Dessuten presenterer vi resultater fra egen overvåking av gassmetning i ti norske elver og tåleforsøk med Atlantisk laks og bunndyr. Gassovermetning forekommer tidvis naturlig i vassdrag, og kan forårsakes av vannkraftverk. Kunstig gassovermetning knyttet til kraftverksdrift er ofte større og mer langvarig enn naturlig gassovermetning. Hovedårsak til gassovermetning i norske vannkraftverk er periodisk luftinndrag i underdimensjonerte bekkeinntak med francisturbiner. For første gang viser vi at også regulær lufting av francisturbiner og tilstopping av inntaksrister kan føre til gassovermetning. I dype elver kan også luftinndrag ved damanlegg og flomluker forårsake gassovermetning.

Det er dokumentert omfattende miljøeffekter av gassovermetning på vannlevende organismer, særlig i Nord-Amerika og Kina, men også i Norge. Gassovermetning kan føre til gassblæresyke hos fisk med konsekvenser som akutt fiskedød eller subletale effekter som kan gi redusert overlevelse på sikt. Det har også blitt påvist effekter på andre organismer, deriblant insekter og amfibier. For første gang vises at gassblæresyke kan også forekomme i døgnfluen *Baetis rhodani*. For de fleste organismer er toleransen til gassovermetning imidlertid ikke kjent og det gjelder særlig for europeiske arter. Ofte blir gassovermetning oversett som miljøfaktor i vassdrag. Det finnes ingen systematisk overvåking av gassovermetning i Norge eller Europa og i de fleste vassdrag er omfanget ikke kjent.

Våre resultater indikerer at gassovermetning er mer utbredd enn antatt. Gassovermetning knyttet til vannkraftverk ble funnet i seks av ti elver der vi mistenkte at det kunne forekomme gassovermetning. Dødelighet hos fisk som følge av gassblæresyke ble registrert i fire av disse elvene, og redusert tetthet og mangfold av bunndyr forkom i en elv som ble undersøkt. I tillegg er det kjent at kunstig gassovermetning har medført akutt fiskedød i minst seks andre norske vassdrag.

Det er vanskelig å sette grenseverdier for akseptable gassovermetningsnivåer siden kunnskap om vannorganismenes toleranse i Norge og Europa er dårlig kjent. Basert på egne studier av Atlantisk lakseparr og fra et omfattende litteratursøk har vi utarbeidet en metode for å vurdere risiko for effekter på lakseparr som følge av gassovermetning. Avhengig av eksponeringstid og vanddyb vil det være høy risiko for dødelighet ved totalgassmetninger over 109-116%. Grunnet manglende kunnskap om toleransen til andre europeiske fiskearter bør det legges stor vekt på føre var prinsippet i håndtering av gassovermetning i vassdragsforvaltning dersom miljøskader skal unngås. Det trengs ny kunnskap om tåleevnen til flere arter og stadier for å kunne presisere og sikre risikovurderingen.

Flere tiltak kan iverksettes for å unngå gassovermetning. I nye kraftverk kan risiko for gassovermetning minimeres ved å utforme anlegget slik at luftinndrag unngås i alle driftssituasjoner. Lufting av turbiner bør overvåkes og gjennomføres slik at det ikke fører til uønsket gassovermetning. Ved eksisterende anlegg kan det etableres vakuuminntak eller regulerbare bekkeinntak, alarmsystemer med gassmetnings- og trykkmåling, automatiske ristenser, dessuten tilpasning av drift og økt lufting av vann. En forutsetning for å kunne redusere miljøskadelig gassovermetning er å kartlegge omfanget av problemstillingen og å øke overvåkingen, særlig for vannkraftverk med høy risiko for gassovermetning. Dessuten bør kunnskapshullene angående biologiske effekter tettes.

9 Referanser

- Antcliffe, B. L., L. E. Fidler, and I. K. Birtwell. 2002a. "Effect of dissolved gas supersaturation on the survival and condition of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under static and dynamic exposure scenarios." In: Canadian Technical Reports Fisheries and Aquatic Sciences.
- Antcliffe, B. L., L. E. Fidler, and I. K. Birtwell. 2002b. 'Effect of dissolved gas supersaturation on the survival and condition of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under static and dynamic exposure scenarios', *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences*: i.
- Arntzen, E. V., D. R. Geist, K. J. Murray, J. Vavrinec, E. M. Dawley, and D. E. Schwartz. 2009. 'Influence of the Hyporheic Zone on Supersaturated Gas Exposure to Incubating Chum Salmon', *North American Journal of Fisheries Management*, 29: 1714-27.
- Beeman, J. W., and A. G. Maule. 2006. 'Migration depths of juvenile Chinook salmon and steelhead relative to total dissolved gas supersaturation in a Columbia river reservoir', *Transactions of the American Fisheries Society*, 135: 584-94.
- Beiningen, K. T., and W. J. Ebel. 1970a. 'Effect of John Day Dam on dissolved nitrogen concentrations and salmon in Columbia river, 1968', *Transactions of the American Fisheries Society*, 99: 664-+.
- Beiningen, K.T., and W.J. Ebel. 1970b. 'Effect of John Day Dam on Dissolved Nitrogen Concentrations and Salmon in the Columbia River, 1968', *Transactions of the American Fisheries Society*, 99: 664-71.
- Berg, Arve. 1992. 'Air entrainment and supersaturation of dissolved air in a shaft under atmospheric and reduced pressure conditions', *Journal of Hydraulic Research*, 30: 327-40.
- Blindheim, B., G. Brox, T. Heggberget, A. Kittelsen, P. Mellquist, and T. Tekle. 1984. "Problemer med luftovermetning i vann fra kraftverk. Komiteen for undersøkelse av gassovermetning (in Norwegian)." In: Oslo: Vassdragsregulantenenes forening.
- Bouck, G. R. 1980. 'Etiology of Gas Bubble Disease', *Transactions of the American Fisheries Society*, 109: 703-07.
- Bouck, G. R., G. A. Chapman, P. W. Schneider, and D. G. Stevens. 1976. 'OBSERVATIONS ON GAS BUBBLE DISEASE AMONG WILD ADULT COLUMBIA RIVER FISHES', *Transactions of the American Fisheries Society*, 105: 114-15.
- Colt, J., G. Bouck, and L. Fidler. 1986. "Review of current literature and research on gas supersaturation and gas bubble trauma." In: Bonneville Power Administration, Portland, Oregon.
- Colt, J., K. Orwicz, and D. L. Brooks. 1987. 'Gas bubble trauma in the bullfrog *Rana catesbeiana*', *Journal of the World Aquaculture Society*, 18: 229-36.
- Colt, John E. 1983. "The computation and reporting of dissolved gas levels', *Water Research*, 17: 841-49.
- Crew, A.V., B.E. Keatley, and A.M. Phelps. 2017. 'Literature review: Fish mortality risks and international regulations associated with downstream passage through hydroelectric facilities', *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.*, 3207: 51.
- DAWLEY, EM, and WJ EBEL. 1975. 'EFFECTS OF VARIOUS CONCENTRATIONS OF DISSOLVED ATMOSPHERIC GAS ON JUVENILE CHINOOK SALMON AND STEELHEAD TROUT', *FISHERY BULLETIN*, 73: 787-96.
- Djordjevic, B., T. Kristensen, O. Overli, B. O. Rosseland, and A. Kiessling. 2012. 'Effect of nutritional status and sampling intensity on recovery after dorsal aorta cannulation in free-swimming Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)', *Fish Physiology and Biochemistry*, 38: 259-72.
- Ebel, Wesley J. . 1969. 'Supersaturation of nitrogen in the columbia river and its effect on salmon and steelhead trout', *FISHERY BULLETIN*, 68.

- Ebel, Wesley J., Earl M. Dawley, and Bruce H. Monk. 1971. 'THERMAL TOLERANCE OF JUVENILE PACIFIC SALMON AND STEELHEAD TROUT IN RELATION TO SUPERSATURATION OF NITROGEN GAS', *FISHERY BULLETIN*, 69: 833-43.
- Ebel, Wesley J., and Howard 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.
- Ebel, Wesley J., Howard L. Raymond, Gerald E. Monan, Winston E. Farr, and George K. Tanonaka. 1974. "Effect of atmospheric gas supersaturation caused by dams on salmon and steelhead trout of the snake and columbia rivers." In, 117. Seattle, Washington: Northwest fisheries center.
- 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. ', *Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg*.
- Fast, A. W. 1979. 'Nitrogen Gas Supersaturation during Artificial Aeration at Lake Casitas, California', *Progressive Fish-Culturist*, 41: 153-55.
- Fast, A. W., and R. G. Hulquist. 1982. 'Supersaturation of nitrogen gas caused by artificial aeration in reservoirs', *Technical report E-82-9 Limnological Associates, Kaneohe, Hawaii*. 140.
- 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.
- Feng, Jing-jie, Ran Li, Hui-xia Yang, and Jia Li. 2013. 'A laterally averaged two-dimensional simulation of unsteady supersaturated total dissolved gas in deep reservoir', *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 25: 396-403.
- Gabrielsen, S. E., B. T. Barlaup, H. Skoglund, G.A. Halvorsen, O. Sandven, T. Wiers, G.B. Lehmann, B. Skår, U. Pulg, K. W. Vollset, and E. Straume. 2011. "'LIV" – livet i vassdragene. Langsiktige undersøkelser av laks og sjøaurebestander i Matreelva i perioden 2006-2011', *LFI-rapport nr. 187. Uni Research Miljø LFI, Bergen*.
- Geist, D. R., T. J. Linley, V. Cullinan, and Z. Q. Deng. 2013. 'The Effects of Total Dissolved Gas on Chum Salmon Fry Survival, Growth, Gas Bubble Disease, and Seawater Tolerance', *North American Journal of Fisheries Management*, 33: 200-15.
- Glennon, J.A., and R.M. Pfaff. 2004. 'The Operation and Geography of Carbon Dioxide-Driven, Cold-Water "Geysers"', *The GOSA Transactions, Gysir Observation and Study Association, Los Alamos, USA*, Volume IX.
- Goyal, R., and B. HGhandi. 2018. 'Review of hydrodynamic instabilities in Francis turnbines during off-design and transient operations.', *Renewable Energy*, 116: 697-709.
- Harvey, H. H. 1975. 'Gas Disease in Fishes - a review.' in W.A. Adams (ed.), *Chemistry and physics of aqueous gas solutions* (Journal of the Electrochemical Society: Princeton, New Jersey).
- 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', *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 29-274, 93: 29-274.
- Hoppe-Seyler, F. 1896. 'Ueber die Verteilung absorbiertes Gase im Wasser des Bodensees und ihre beziehung zu den in ihm lebenden Pflanzen und Thieren', *Sch. Ver. Gesch. Bodensees*, 24: 29-48.
- Jarnefelt, H. . 1949. 'Der Einfluss der Stromschnellen auf den Sauerstoff und Kohlensäuregehalt und das pH des Wassers im Flusse Vuoksi', *Verb. Int. Ver. Limnol.*, 10: 210-15.
- 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.
- Kanstad-Hansen, Ø. 2012. 'Fiskefaglig aktivitet 2007 – 2011', *Prosjektrapport. Ferskebvannsbilgen.net*.
- Krise, W. F. 1993. 'Effects of One-Year Exposures to Gas Supersaturation on Lake Trout', *Progressive Fish-Culturist*, 55: 169-76.

- Krise, William F., and Roger L. Herman. 1991. 'Resistance of Underyearling and Yearling Atlantic Salmon and Lake Trout to Supersaturation with Air', *Journal of Aquatic Animal Health*, 3: 248-53.
- Lerfall, J., B. Roth, E. F. Skare, A. Henriksen, T. Betten, M. A. Dziatkowiak-Stefaniak, and B. T. Rotabakk. 2015. 'Pre-mortem stress and the subsequent effect on flesh quality of pre-rigor filleted Atlantic salmon (*Salmo solar* L.) during ice storage', *Food Chemistry*, 175: 157-65.
- 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.
- Macdonald, J. Rod, and R. A. Hyatt. 1973a. 'Supersaturation of Nitrogen in Water During Passage Through Hydroelectric Turbines at Mactaquac Dam', *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 30: 1392-94.
- MacDonald, J.R., and R.A. Hyatt. 1973b. 'Supersaturation of nitrogen in water during passage through hydroelectric turbines at Mactaquac Dam', *Journal Fisheries Research Board of Canada*, 30: 3.
- Marking, L.L. 1987. 'Gas supersaturation in fisheries - Causes, Concerns, and Cures', *National Fisheries Research Center, U.S. Fish and Wildlife Service*: 15.
- Marsh, M.C., and F.P. Gorham. 1905. 'The gas disease in fishes', *Report of U.S. Bureau of Fisheries 1904*: 343-76.
- Montgomery, J. C., and D. H. Fickeisen. 1979. 'Tolerance and Buoyancy of Aquatic Insect Larvae Exposed to Gas Supersaturated Water', *Environmental Entomology*, 8: 655-57.
- Nebeker, A. V., F. D. Baker, and S. L. Weitz. 1981. 'Survival and Adult Emergence of Aquatic Insects in Air-Supersaturated Water', *Journal of Freshwater Ecology*, 1: 243-50.
- Nebeker, Alan V. 1976. 'Survival of Daphnia, Crayfish, and Stoneflies in Air-Supersaturated Water', *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 33: 1208-12.
- Nebeker, Alan V., Gerald R. Bouck, and Donald G. Stevens. 1976. 'Carbon Dioxide and Oxygen-Nitrogen Ratios as Factors Affecting Salmon Survival in Air-Supersaturated Water', *Transactions of the American Fisheries Society*, 105: 425-29.
- Nikinmaa, M. 1982. 'Effects of adrenaline on red-cell volume and concentration gradient of protons across the red-cell membrane in the rainbow trout, *Salmo gairdneri*', *Molecular Physiology*, 2: 287-97.
- Noble, C., J. Nilsson, L. H. Stien, M. H. Iversen, J. Kolarevic, and K. Gismervik. 2018. 'Velferdsindikatorer for oppdrettslaks: Hvordan vurdere og dokumentere fiskevelferd. ISBN 978-82-8296-531-6. Open acces.', ISBN 978-82-8296-531-6. Open acces. : 328 p. .
- Pulg, U., G. Velle, W. K. Vollset, S. Stranzl, and E.E. Olsen. 2018a. 'Gassovermetning i Otra og muligheter for avbøtende tiltak. Technical report. Uni Research Miljø LFI-rapport nr. 319, ' *Uni Research Miljø LFI-rapport nr. 319*: 26.
- Pulg, U., Sebastian Stranzl, Knut Wiik Vollset, Bjørn Torgeir Barlaup, Espen Olsen, Bjørnar Skår, and Gaute Velle. 2016. 'Gassmetning i Otra nedenfor Brokke kraftverk. ', *LFI-rapport nr. 217. Uni Research Miljø LFI, Bergen*: 67.
- Pulg, U., and S. Stranzl. 2015a. 'Gassmetning i Vetlefjordselva ved Mel kraftverk. ', *Technical Report no. 258. Bergen, Norway: Uni Research Miljø LFI*.
- Pulg, U., Stranzl, S.. 2015b. 'Gassmetning nedstrøms småkraftverk med installert omløpsventil', *LFI Rapport 255. Uni Research Miljø LFI, Bergen*
- Pulg, U., S. Stranzl, and E. Olsen. 2018. 'Gassmetning i Evangervatnet', *In: Barlaup, T.B. (red.) Redningsaksjon for Vosolaksen - Fremdriftsrapport per 2017. LFI rapport 300. Uni Research Miljø LFI, Bergen*: 128-49.
- Pulg, 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.
- Pulg, U., K. W. Vollset, G. Velle, and S. Stranzl. 2016. 'First observations of saturopeaking: Characteristics and implications', *Science of the Total Environment*, 573: 1615-21.

- Pulg, Ulrich, Bjørn T. Barlaup, and Eirik Straume Nordmann. 2014. "Gassmetning ved Brokke kraftverk - Technical Report on supersaturation." In. Bergen: Uni Research Environment. Notat 2014
- Pulg, Ulrich, Sven Erik Gabrielsen, and Eirik Straume Normann. 2013. "Gassmetning i tre LIV-elver, Matreelva, Modalselva og Vossovassdraget - Technical Report on supersaturation." In. Bergen: Uni Research Environment. Notat 2013
- Qu, Lu, Ran Li, Jia Li, KeFeng Li, and Yun Deng. 2011. 'Field observation of total dissolved gas supersaturation of high-dams', *Science China Technological Sciences*, 54: 156-62.
- Rogers, G. 2005. 'Total Gas Saturation Considerations for Recirculating Aquatic Systems', *International Journal of Recirculating Aquaculture*, 6: 39-48.
- Rosslund, Bjørn Olav. 1999. 'Vannkvalitetens betydning for fiskehelsen.' in Trygve Poppe (ed.), *Fiskehelse og fiske sykdommer* (Universitetsforlaget AS: Oslo).
- Stenberg, S.K., G. Velle, M.D. Powell, and Å. Åtland. 2018. 'Effekter av gassovermetning på migrerende laksesmolt i Evangervatnet', In: *Barlaup, T.B. (red.) Redningsaksjon for Vossolaksen - Fremdriftsrapport per 2017. LFI rapport 300. Uni Research Miljø LFI, Bergen.*
- Stokkebø, G., B. Berdal, G. Brox, E. Fleischer, G. Guttormsen, A. Kjeldsen, and K. Tvinnereim. 1986. "Bekkeinntak på kraftverkstunneler. Sluttrapport fra Bekkeinntakkomiteen (in Norwegian)." In. Asker: Vassdragsregulantenenes forening.
- Stranzl, S., E.E. Olsen, and U. Pulg. 2017. 'Gassmetning ved Evenstad kraftverk i Nidelva', *LFI notat 2017. Uni Research Miljø LFI, Bergen.*
- Thorstad, E.B., F. Kroglund, F. Økland, and T.G. Heggberget. 1997. "Vurdering av luftovermetning, trefiberutslipp og oppvandring av laks ved Rygene kraftverk i Nidelva, Aust-Agder." In, 36. Trondheim: NINA.
- Velle, G. , Godtfred A. Halvorsen, Ulrich Pulg, and Espen Olsen. 2017. 'Påvirkning fra gassovermetning på bunndyr i Otra nedstrøms Brokke', *LFI rapport 283, Uni Research Miljø LFI: 26.*
- Wang, Y. M., R. F. Liang, Y. C. Tuo, K. F. Li, and B. Hodges. 2015. 'Tolerance and Avoidance Behavior towards Gas Supersaturation in Rock Carp *Procypris rabaudi* with a History of Previous Exposure', *North American Journal of Aquaculture*, 77: 478-84.
- Weitkamp, D. E., and M. Katz. 1980. 'A review of dissolved gas supersaturation literature', *Transactions of the American Fisheries Society*, 109: 659-702.
- Weitkamp, Don E. 2008. "Total dissolved gas supersaturation biological effects, review of literature 1980-2007." In, 65. Bellevue, Washington: Parametrix.
- Zarfl, Christiane, Alexander E. Lumsdon, Jürgen Berlekamp, Laura Tydecks, and Klement Tockner. 2015. 'A global boom in hydropower dam construction', *Aquatic Sciences*, 77: 161-70.
- Zhang, Y., G. Zhou, and A. Prosperetti. 2017. 'Bubbles as a means for the deaeration of water bodies.', *Journal of environmental engineering-ASCE*, 143.



Laboratorium for ferskvannøkologi og innlandsfiske (LFI)

LFI ble opprettet ved Universitet i Bergen i 1969, og er nå en seksjon ved Norwegian Research Centre (NORCE). LFI gjennomfører forskning, overvåking, tiltak og utredninger innen ferskvannøkologi. Vi har spesiell kompetanse på laksefisk (laks, sjøaure, innlandsaure) og bunndyr, og på hvilke miljøbetingelser som skal være til stede for at disse artene skal ha livskraftige bestander. Sentrale tema er:

- Bestandsregulerende faktorer
- Gytebiologi hos laksefisk
- Biologisk mangfold basert på bunndyrsamfunn i ferskvann
- Effekter av vassdragsreguleringer
- Effekter av fiskeoppdrett, lakselus og rømming
- Forsuring og kalking
- Habitattanalyser
- Vassdragsrestaurering
- Miljødesign og habitattiltak
- Effekter av klimaendringer
- Fiskepassasjer
- Gassovermetning