

# Gassmetning i Otra nedenfor Brokke 2016 – 2017 og muligheter for avbøtende tiltak



# Laboratorium for ferskvannsekologi og innlandsfiske (LFI)

**Uni Research Miljø**

Nygårdsgaten 112

5008 Bergen

**Telefon:** 55 58 22 28

**ISSN nr:** ISSN 1892-8889

**LFI-rapport nr:** 296

**Tittel:** Gassovermetning i vassdrag – en kunnskapsoppsummering

**Dato:** 30.09. 2018

**Forfattere:** Ulrich Pulg, Knut W. Vollset, Sebastian Stranzl, Espen O. Espedal (Uni Miljø LFI)

Christoph Hauer, Peter Floedl (BOKU Wien, IWHW)

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

**Geografisk område:** Norge

**Finansiering:** Agder Energi (AE), Otra Kraft

**Antall sider:** 31

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

**Sammendrag:** Rapporten består av tre deler: resultater fra gassmetningsovervåking i 2016 og 2017, en analyse av utgassing i Otra nedenfor Brokke, samt en modellering av tiltak til økt lufting av gassovermettet vann.

Overvåkingen viste at gassmetningen i Otra nedenfor Brokke kraftverk hadde et forløp som i årene før med høy gassmetning under vårløsning og etter mye nedbør. Gassmetningen var over 110 % TDG (total dissolved gases) i 38,1 % av tiden i 2016 og nådde maksimalt 176 %. I 2017 var det mer enn 110 % metning i 28,9 % av tiden og logget maksimalverdi var 169 %.

Analyse av hydrauliske forhold og utlufting i Otra viste en signifikant sammenheng mellom skjærspenning og utlufting, samt frie vandropp og utlufting. Med resultatene kunne vi lage en matematisk modell som simulerer gassmetning i Otra nedenfor Brokke avhengig av utgangsmetning og skjærspenning. Med dataene om utgassing i frie vandropp har vi laget en utgassingsmodell per antall dropp – men her trengs det flere data for å kunne kalibrere og validere modellen.

Med grunnlag i dette har vi vurdert forskjellige muligheter til økt lufting av vannet i Otra og dam Tjurrmo. Modellene tyder på at både steinutlegg og særlig installering av nye vandropp (terskel i elven og deflektor i dam Tjurrmo) vil kunne bidra til økt utgassing. Tiltaket med deflektor i dam Tjurrmo vil sannsynligvis være nok for å skjerme blekehabitat i minstevannføringsstrekning (Tjurrmo-Langeid) for gassmetninger over ca. 110 % i vanlige driftssituasjoner med slipp av minstevannføring. For å skjerme habitatet ytterligere trengs det også hensyn ved planlegging av driftsstans i Hekni, perioder med vannslipp bør legges i tidsrom med overmetning i Rysstadbassenget under 110 %.

**Pulg, U., Vollset, W.K., Stranzl, S., Espedal, O.E., Hauer, C., Floedl, P. 2018: Gassovermetning i Otra nedenfor Brokke 2016-2017 og muligheter for avbøtende tiltak. Uni Research Miljø LFI rapport 319. Uni Research Bergen. ISSN 1892-8889**

## Innhold

1 Introduksjon .....	3
2 Metoder.....	4
3 Resultater .....	5
3.1 Gassmetning 2016.....	5
3.3 Gassmetning 2017 .....	7
3.4 Oppmåling av elvemorfologi og hydrauliske forhold .....	9
3.5 Statistisk analyse av utgassing.....	10
3.6 Scenarier med modellert effekt .....	14
4 Diskusjon .....	19
4.1 Gassdata .....	19
4.2 Muligheter for avbøtende tiltak ved lufting av vann i elven .....	19
Løsningsalternativ 1) Fritt overløp .....	22
Løsningsalternativ 2) Økt ruhet.....	22
Løsningsalternativ 3 – Deflektor i dam Tjurrmo.....	23
5. Litteratur.....	26
Vedlegg med større figurer .....	27

## 1 Introduksjon

Gassovermetning har blitt dokumentert i Otra nedenfor Bokke kraftverk siden 2011, Overvåkingen 2012-2015 samt en analyse av årsakene er sammenfattet i Pulg et al. (2016). Det forekommer lange perioder (opptil flere uker) med gassovermetning over 110 % og toppene når rundt 170 % TGP (Tota Gas Pressure). Årsak er bekkeinntak som river med seg luft når det er høy vannføring på fjellet (vårløsning, mye nedbør). Gassovermettet vann transporteres over mange kilometer i elven og kan vanligvis følges til nedenfor Hekni kraftverk (ca. 20 km) men delvis også 30 km til Åraksfjorden.

I denne studien presenteres gassmetningsdata fra Brokke kraftverk i årene 2016 og 2017. I tillegg har vi gjennomført en analyse av utgassing i Otra basert på data 2012-2017. Med dette datagrunnlaget har vi beregnet muligheter til økt utgassing og vurdert om det er mulig å redusere gassovermetning i dagens blekehabitat til under 110 % (nedenfor Hekni og dam Tjurrmoen).

## 2 Metoder

### Overvåking av gassmetning

Uni Research Miljø har på oppdrag fra Agder Energi overvåket gassmetning med varighetslogging ved utløpet av Brokke kraftverk mellom 2016 - 2017. Det ble også blitt gjennomført varighetslogging 11 km, 11.2 km, 19 km, 19.2 km og 30 km nedstrøms kraftverksutløpet i 2016. Ressurser for logging i 2017 ble sterkt redusert slik at det kunne bare logges ved Brokke kraftutløp. Loggingen er gjennomført ved bruk av robuste feltloggere (Fisch und Wassertechnik) som er tilkoblet internett (GSM modem) og strømnettet (230 V). Målemetoden er basert på et «Weiss-Saturometer» i sonden, og det som registreres er metning av alle gasser i vannet (Total Gass Pressure, TGP) relativt til atmosfærisk lufttrykk. Verdien gjenspeiler derfor gassmetningen som vannet ville hatt ved vannoverflaten selv om det er målt i varierende dyp (10-200 cm). Det ble lagret halvtimes-verdier. Gassmetningen er gjengitt i prosent TGP, der 100 % tilsvarer normal gassmetningsgrad. Lavere verdier betyr at vannet er undermettet med gasser, mens høyere verdier betyr at vannet er overmettet. Målerens nøyaktighet er på +/- 10 hPa noe som tilsvarer ca. +/- 1 % TGP. I følge kanadiske retningslinjer anbefales maksimalt 110 % TGP gassovermetning i vassdrag som er dypere enn 1 m. I grunnere omgivelser og i klekkerier anbefales 103 % TGP som grenseverdi. Nærmere opplysninger finnes i Pulg et al. (2016).

Dataene fra forskjellige loggere i Otra nedenfor Brokke 2012-2015 ble brukt for å analysere utgassing i elven avhengig av hydrauliske, morfologiske og fysiske egenskaper. Bare til og med 2015 var det nok loggere installert for å følge utviklingen av utgassing. Hydrauliske forhold ble modellert med en 1D hydrodynamisk numerisk modell (HEC-RAS). Modellen ble basert på topografisk oppmåling av elveleiet nedenfor Brokke ved lav vannføring 3 - 6. juli 2017. Dype partier i Rystadbassenget ble dessuten målt opp med ekkolodd (Tore Kviljo). Variablene som ble undersøkt var temperatur, vannføring, vannvolum, vannoverflateareal, dyp, gradient, Froude nummer, vannhastighet, energilinjevariasjon, stream power, skjærspenning, turbulens, energivariabilitet og tid. Det ble brukt simple uni-variable lineære modeller for å sammenligne de enkelte variablene med utgassing ved hjelp av Akaike Information Criterion (AIC).

### Hydraulisk modell

For å beregne de hydrauliske parameterne som ble lagt til grunn i utgassingsanalysen ble det brukt en 1D-hydrodynamisk-numerisk modell (HEC-RAS). Inngangsdataene ble basert på egne topografiske oppmålinger (juli 2017) gjennomført med differensiell GPS og ekkolodd i dype områder (Rystadbassenget). Det ble dessuten brukt egne temperaturmålinger og vannføringsdata disponert fra Otra Kraft. Med målingene og modellen ble det sammenstilt eller beregnet følgende parameter som grunnlag for analysen:

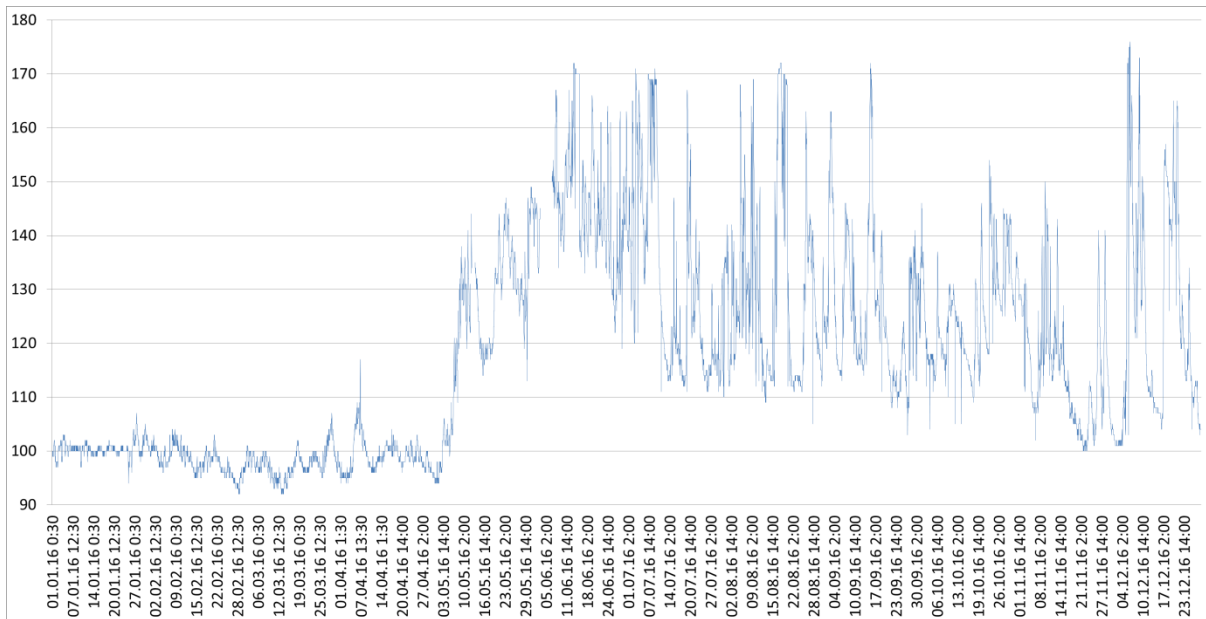
- Vannføring
- Vanntemperatur
- Gsnitt. vannhastighet
- Gsnitt. vanddyb
- Energilinjegradient

- Stream power
- Skjærspenning
- Froude tall
- Overflateareal
- Vannvolum
- Turbulens
- Gjennomsn. oppholdstid per elveavsnitt

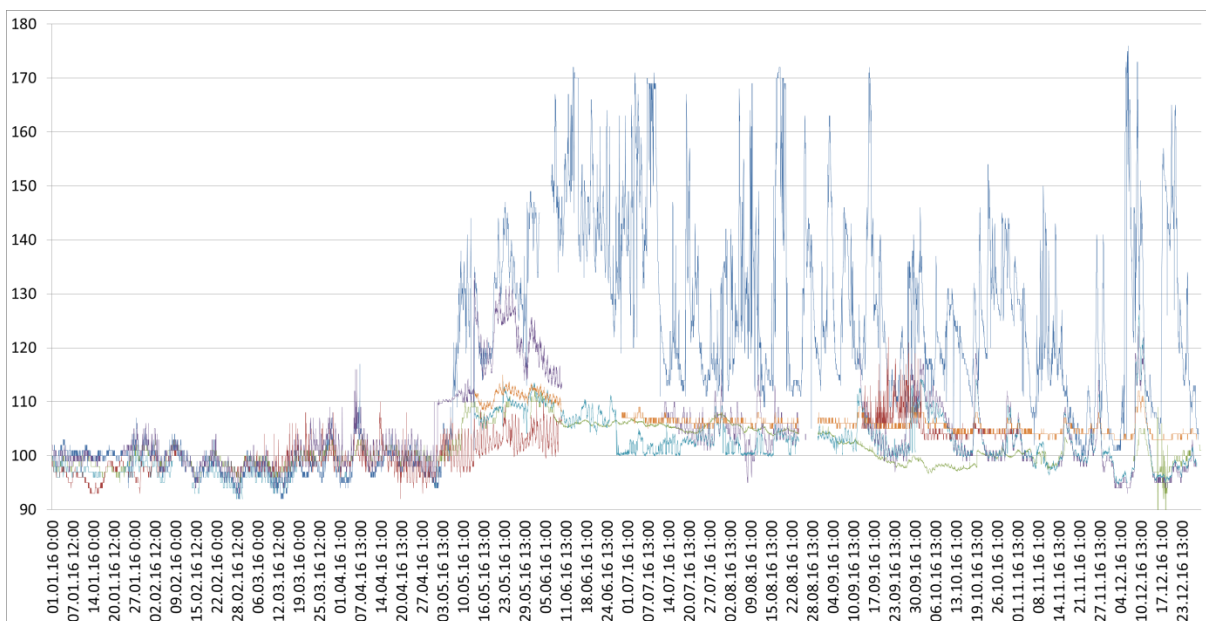
## 3 Resultater

### 3.1 Gassmetning 2016

Gassmetningen ved Brokke kraftverk varierte mellom 87 % og 176 % i overvåkingsperioden 01.01.2016 – 31.12.2016. I starten av året lå nivåene oftest mellom lett undermettet til lett overmettet vann. Fra midten av februar og utover våren fluktuerte nivåene noe mer, men med unntak av en svært kortvarig topp i første halvdel av april ble det ikke observert verdier over 110 % TGP. I begynnelsen av mai steg gassmetningen betydelig og nådde verdier over 140 % TGP. Resten av året var preget av hyppige gassmetningsbølger der verdiene sjelden gikk under 110 % TGP (Figur 1). Også på de andre stasjonene som er lokalisert mellom 11 – 30 km nedstrøms kraftverket ble det periodevis registrert potensielt skadelige gassmetningsnivåer for laksefisk (Figur 2). Gjennomsnittlig verdi ved Brokke kraftverk var 110,3 % TGP for hele overvåkingsperioden 2016. I 95 % av tiden var gassmetningen under 142 %, 75 % av tiden under 116 %, 50 % av tiden (medianverdi) under 105 %, 25 % av tiden under 100 % og 5 % av tiden under 96 % TGP (Tabell 1). Figuren under vises også i større format i vedlegg.



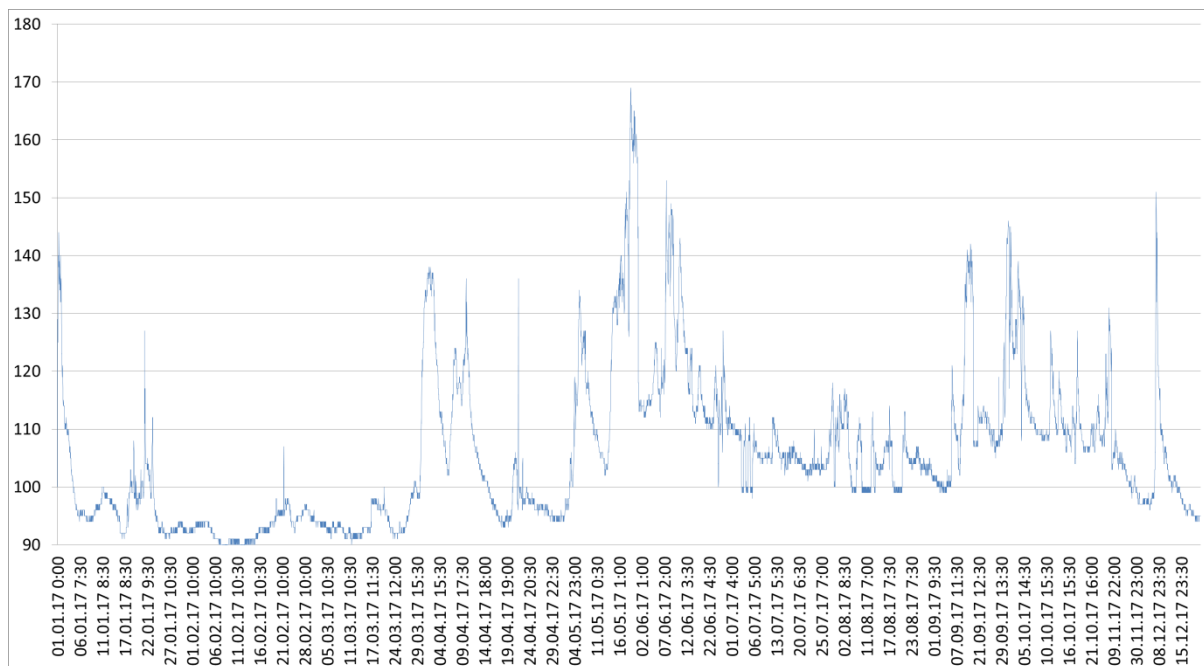
Figur 1 Gassmetning (TGP) målt i prosent ved utløpet av Brokke kraftverk i perioden 01.01.2016 – 31.12.2016.



Figur 2 Gassmetning (TGP) målt i prosent ved alle stasjonene i overvåkingsperioden 01.01.2016 – 31.12.2016. Blå linje viser utløpet av Brokke kraftverk, lilla linje viser stasjonen ovenfor tjurrmoen (11 km nedstrøms Brokke), oransje linje viser stasjon nedenfor Tjurrmoen (11,2 km nedstrøms Brokke), turkis linje viser stasjon ved Utløp Hekni (19km nedstrøms Brokke), rød linje viser stasjon ovenfor Blekeløpet (19,2 km nedstrøms Brokke) og den grønne linjen viser stasjonen ved pH-stasjon (30 km nedstrøms Brokke).

### 3.3 Gassmetning 2017

Gassmetningen ved Brokke kraftverk varierte mellom 89 % og 169 % TGP i overvåkingsperioden mellom 01.01.2017 – 20.12.2017. I første uken av året oppstod en gassmetningstopp som nådde verdier over 140 % TGP (Figur 3). En ny gassmetningsbølge som hadde en kortvarig topp som oversteg 120 % TGP oppstod i slutten av januar. Etter dette sank gassmetningsverdiene og det var generelt lett gassundermetning frem til slutten av mars 2017. I starten av april steg verdiene og to ukelange gassmetningsbølger med verdier opp til over 130 % TGP ble registrert på loggeren. I starten av mai var det en bølge med verdier opp til over 130 % TGP med omtrent en ukes varighet. Denne ble etterfulgt av en langvarig bølge som strakk seg ut i juli måned og nådde verdier opp til 169 % TGP (maksverdi). Fra midten av juli til starten av august var det generelt lett overmetning mellom ca. 102 % og 105 % TGP. I august varierte nivåene mye og det oppstod en rekke kortvarige bølger over 110 % TGP. Perioden mellom andre uken i september frem til starten av desember var preget av bølger med nivåer opp til 146 % TGP. Gjennomsnittlig verdi var 105,3 % TGP for hele overvåkingsperioden 2017. I 95 % av tiden var gassmetningen under 133 %, 75 % av tiden under 111 %, 50 % av tiden (medianverdi) under 103 %, 25 % av tiden under 96 % og 5 % av tiden under 92 % TGP (tabell 1). Resultater fra hele loggingsperiode 2012 -2017 er sammefattet i tabell 2, (Pulga et al., 2016a).

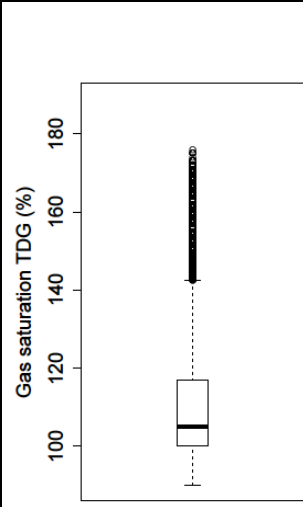
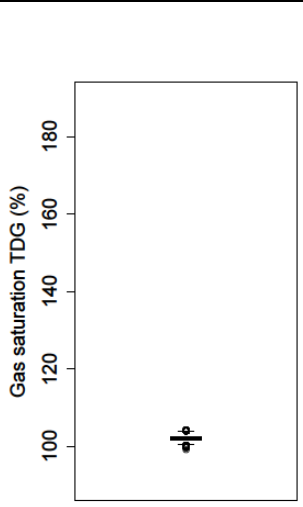


Figur 1: Gassmetning (TGP) målt i prosent ved utløpet av Brokke kraftverk i perioden 01.01.2017 – 20.12.2017.

Tabell 1. Oversikt over gassmetningsverdiene i ved utløpet av Brokke kraftverk fra januar 2016 frem til desember 2017. Tabellen viser persentiler (50, 75 og 95), antall gassmetningstopper med mer enn én times varighet over 110 % TGP og prosentandelen tid av det respektive årets overvåkingsperiode hvor det var over 110 % gassovermetning.

		Utløp Kraftstasjon
2016	min	87 %
	maks	176 %
	middel	110,3 %
	x5	96 %
	x25	100 %
	x50	105 %
	x75	116 %
	x95	142 %
	Antall topper over 110 % TGP	17
	% tid over 110 % TGP	38,1 %
2017	min	89 %
	maks	169 %
	middel	105,3 %
	x5	92 %
	x25	96 %
	x50	103 %
	x75	111 %
	x95	133 %
	Antall topper over 110 % TGP	21
	% tid over 110 % TGP	28,9 %

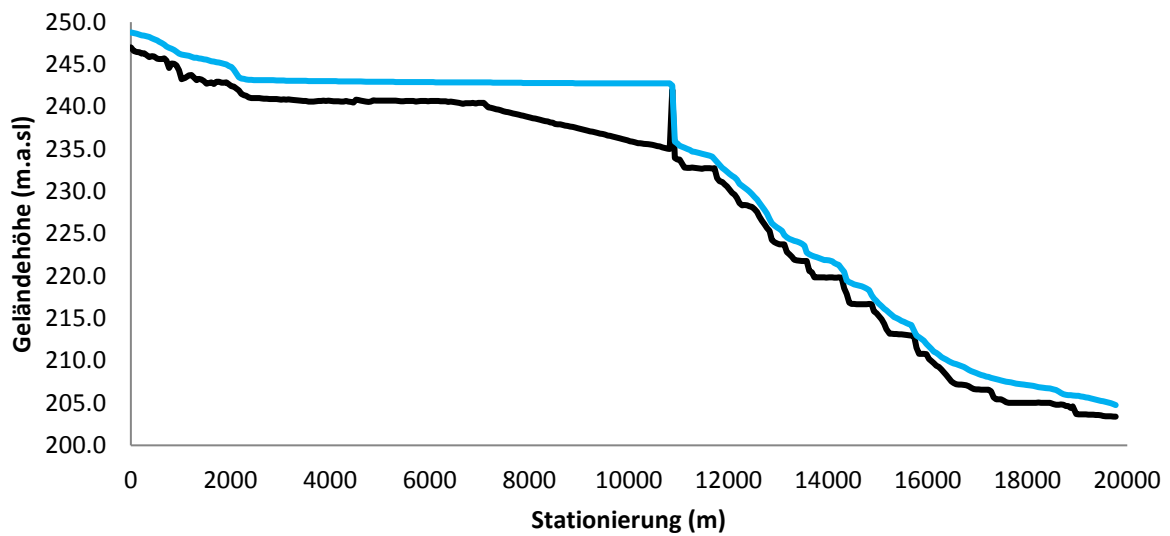
Tabell 2. Oversikt over sassovermetning ved Brokke kraftverk 2012-2017 med box-plots, persentiler og varighet.

 <p>Gas saturation TDG (%)</p> <p>Brokke hydroplant</p>	Min	90 %	 <p>Gas saturation TDG (%)</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 %

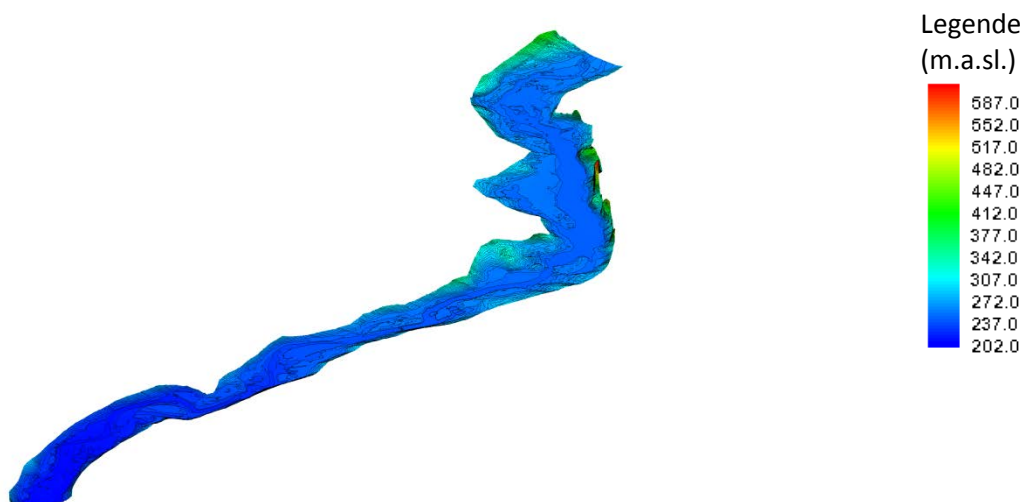


### 3.4 Oppmåling av elvemorfologi og hydrauliske forhold

4-6. Juli 2017 ble Brokke kraftverk stoppet i perioder og det ble gjennomført topografiske oppmålinger av elvebunnen. Sammen med vannføringsdata ble de topografiske dataene sammen med vannføringsdata som ble disponert av oppdragsgiver lagt til grunn for modellering av hydrauliske forhold ved de forskjellige gassovermetningshendelser og utgassing nedover elven (s.n.). Figuren under anskueliggjør en del av den hydrauliske modellen.



Figur 3 Lendprofil fra Brokke til utløp Hekni med dataene som gikk inn den hydrauliske modellen.



Figur 4 - 3D Terreng modell fra strekninge nedenfor Brokke samt Ryssatdbassenget

### 3.5 Statistisk analyse av utgassing

Bølger med gassovertmettet vann som ble logget i de siste årene ble statistisk analysert for å lete etter muligheter til raskere utlufting. Det ble lagt til grunn loggerdata mellom 2012 og 2017 fra Brokke kraftverk og nedover. Det ble identifisert 63 utgassingshendelser som ble analysert med de da herskende gassfysiske rammebetingelser (temperatur, luftkontaktflate og hydrauliske egenskaper).

Vi kan skille mellom to typer utgassing i Otra nedenfor Brokke: Fritt overfall og utgassing i rennende vann.

#### 1. Fritt overfall

Størst relativ utgassing er det i det frie vannoverfallet ved Dam Tjurrmoen. Her ligger utgassingene mellom 7,5 og 7,8 TDG-prosent per km (mot 0,01 og 0,5 TDG-prosent per km ellers i elva). Den reelle utgassingseffekten kan være enda større siden loggeravstanden (54 m) er større enn selve vandroppsonen (ca. 5 m). TDG overmetning ble redusert med ca. 40 % i overløpet. I et lignende overløp i Vetlefjordelva dog med lavere utgangsmetning, ble det funnet en lignende effekt ved 1 m dropp (- 30 %, Pulg et al., 2015). I modellene nedenfor ble det lagt til grunn en reduksjon på 30 % ( $G_0$ ) per fritt dropp i elv, en 40 % ( $G_0$ ) reduksjon ved uendret dropp i Dam Tjurrmoen og en reduksjon med 40 % per dropp ( $G_0$ ), i dam Tjurrmoen (se modell nedenfor). Det kan godt hende at det gasser ut mer luft i et dobbeldropp ved Tjurrmoen, men vi har enda ikke nok data for å kunne teste dette. Derfor legger vi konservative erfaringstall fra terskler eller tidligere dropp i dammen til grunn.

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

$G_0$  : Utgangsgassmetning i %

$G_e$  : gassmetning etter droppene i %

n: Antall dropp

#### 2. Utgassing i rennende vann i elva

For å beskrive utgassingene av TDG i Otra benytter vi en enkel eksponentiell nedgangsfunksjon:

$$1. \frac{\Delta G}{\Delta L} = -K \times (G_0 - 100)$$

**Delta G** : Delta gassmetning mellom to loggere

**G<sub>0</sub>**: Total Dissolved Gas (TDG) metning i prosent

**Delta L:** Avstand i kilometer mellom to målepunkter

**K** er den eksponentielle nedgangskonstanten.

**G<sub>km</sub>:** Gassmetning i avstand delta L nedenfor G<sub>0</sub>

**e:** Eulers tall,  $e \approx 2,71828$

Løsningen av denne ligningen er:

$$2. \quad G_{km} = 100 + (G_0 - 100)e^{-K \times \text{delta L}}$$

Hvor  $G_{km}$  er TDG nedenfor målingspunktet til  $G_0$  og delta L er avstanden mellom de to målepunktene. Ved å omorganisere ligning nummer en er det lett å kalkulere K basert på delta G, delta L. K, som er definert som en utgassingskonstant, ble så kalkulert for hver endring i G (deltaG) mellom de forskjellige loggerne, for hver av de forskjellige eventene. Ved å benytte disse verdiene, satte vi opp en enkel lineær modell for å undersøke hvilke forklaringsvariabler som påvirker K. De forskjellige variablene kan bli klassifisert i 5 forskjellige hovedkategorier. Innen hver kategori korrelerer de forskjellige målingene sterkt, ettersom de beskriver det samme mønsteret. Kategoriene er:

- Temperatur
- Vannføring
- Elvemorfologi
- Vanngemetri
- Hydraulikk

For å kunne velge en faktor fra hver kategori, ble det benyttet enkle uni-variable lineære modeller som innen hver kategori ble sammenlignet ved bruk av Aikake Information Criterion (AIC). Før seleksjon ble det undersøkt for ikke-lineæritet ved bruk av «smoothing» funksjon. Å legge til andregrads polynomialer ga ikke meningsfulle forhold til noen av variablene. I tillegg var økning i  $r^2$  minimal og vi inkluderte derfor ikke andregrads polynomialer i den endelige modellen.

Bare variabler med en p-verdi  $< 0.15$  ble selektert til å bli inkludert i den multi-variable modellen.

Til slutt ble den endelige modellen av K brukt til å undersøke hvordan TDG endrer seg med km nedstrøms etter modellen, og det ble plottet forskjellige modellerte scenarioer.

## Resultater

### Uni-variabel modellering

Hverken temperatur eller vannføring hadde signifikant effekt på utgassingskonstanten ( $p > 0.15$ , Tabell 3). For morfologiske karakteristikk var gradient den beste forklaringsvariablen. For

vangeometri var forholdet mellom areal og volum det som ga de beste prediksjonene, mens for hydrologi ga skjærspenning best prediksjon.

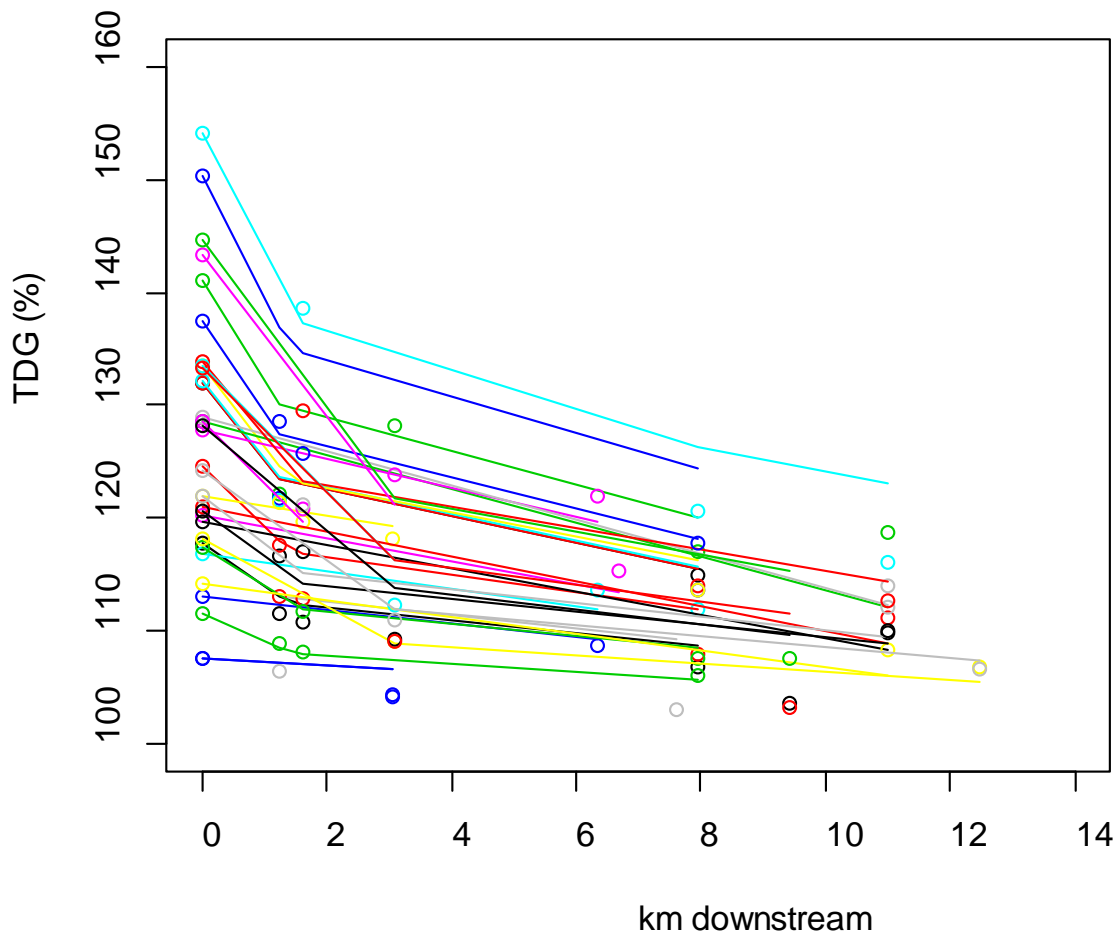
Tabell 3. Tabell 1 De forskjellige kategoriene av forklaringsvariabler og variabler med AIC og p-verdier angitt.

		AIC	P	Selected
Temperatur				
	Temperatur (C°)	-83.1	>0.15	
Vannføring				
	Vannføring (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	-87.9	>0.15	
Morfologi				
	Gradient vannoverflate	-130.5	<0.05	
	Gradient terreng	<b>-141.8</b>	<0.05	*
Vangeometri				
	Areal/Volum	<b>-117.44</b>	<0.05	*
	Dybde	-101.8	<0.05	
Hydraulikk				
	Vannhastighet	-138.9	<0.05	
	Skjærspenning	<b>-143.0</b>	<0.05	*
	Stream power	-139.8	<0.05	
	Froude nummer	-140.0	<0.05	
	Energivariabilitet	-128.2	<0.05	
	Turbulens	-127.2	<0.05	
	Energibredde	-97.6	<0.05	
	Tid	-115.8	<0.05	

Det er skjærspenningen som har størst forklaringsverdi for utgassing i Otra (AIC = -143, p < 0,05, R2= 0,6).

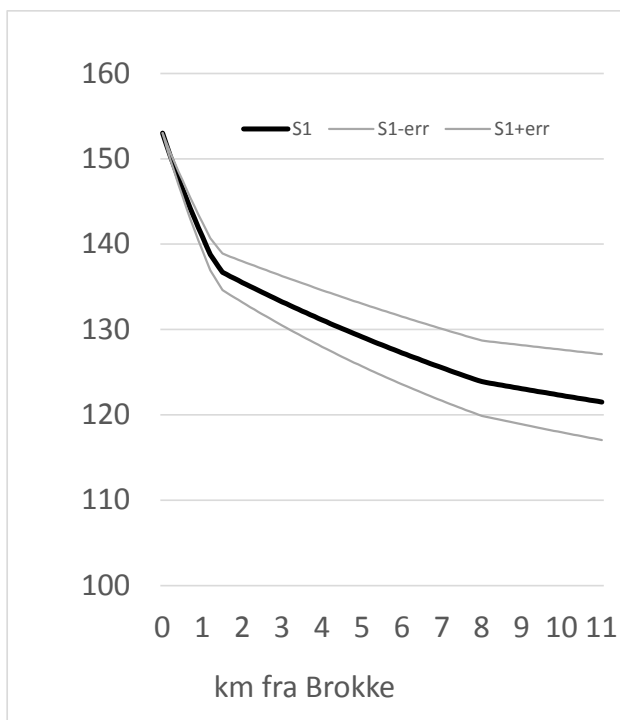
Basert på en multivariabel modell  $K \sim ShSt + AV + Gr$  finner vi følgende formel for å beregne utgassing i Otra nedenfor Brokke:

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



Figur 5 Modellert gassovermetning i Otra (linjer) versus observert utgassing (punkter)

Figur 6 Standardfeil plottet for modellen ved 153 % fra Brokke og 11 km nedstrøms (uten tiltak (basert på dagens målinger) Standardfeil ved Dam Tjurmoen (11 km) er +5,6 % og -4,4 %



### Utgassing i Hekni kraftverk

Utgassing i Hekni kraftverk ble beregnet til 70 % basert på 3 godt dokumenterte gassbølger som oppfylte kriteriene til utgassingsanalysen. I etterkant er det imidlertid også dokumentert gassbølger som ble langt mindre redusert (se diskusjonskapittel).

### 3.6 Scenarioer med modellert effekt


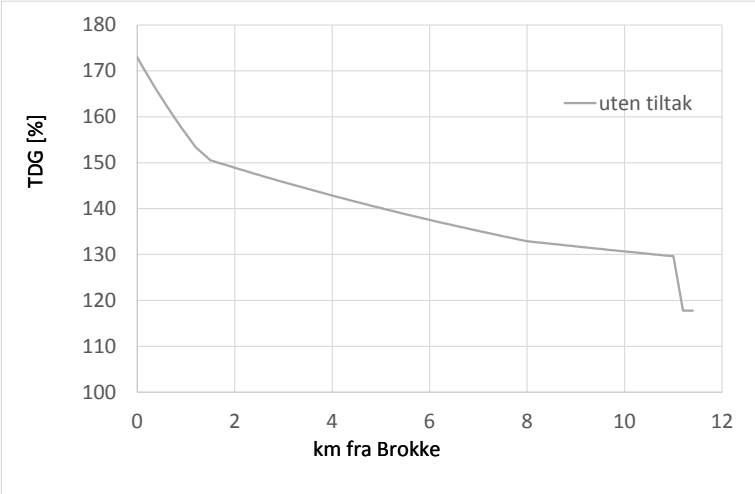
Med resultatene og modellen ovenfor har vi beregnet scenarioer for utgassing nedenfor Brokke – med og uten tiltak.

Vi har lagt til grunn fem tiltak:

- utlegging av stein på 1,6 km lengde nedenfor Brokke (Total lengde til Rysstadbassenget er ca. 2300 m) med økning av skjærspenning med 53 %
- tettere utlegging av stein på 1,6 km lengde nedenfor Brokke (Total lengde til Rysstadbassenget er ca. 2300 m) med økning av skjærspenning med 100 %
- Diagonal terskel ca. 1000 m nedenfor Brokke med 300 m lengde og fritt overfall på 1 m.
- Deflektor (med dobbel dropp) ved Dam Tjurmoen. I stedet for ett fall droppes restvannmengden ca. 2 m ned der det treffer en deflektor som leder vannet over et ytterligere dropp. Per dropp legges en reduksjon av relativ gassmetning på 40 %. Dette er basert på målinger før, på terskler andre steder og på en pilotforsøk med deflektor i Tjurmoen dam (16 timer med data).

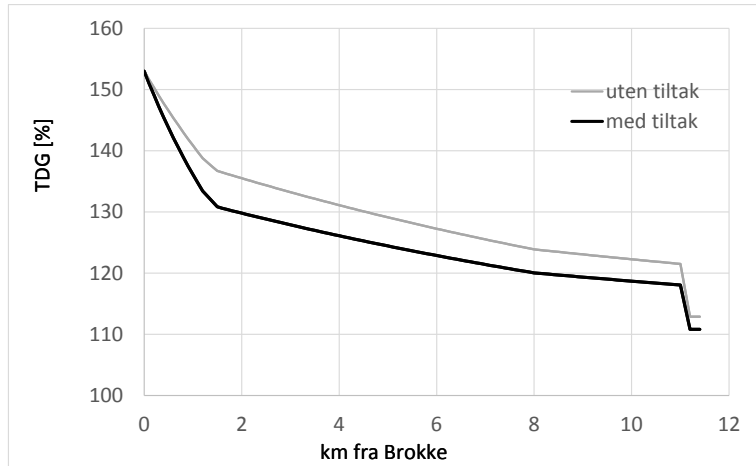
Scenarioene ble beregnet for maksimal snittverdi fra Brokke (153 % TDG) og maksimalverdi (173 %).

Målsettingen var å komme under 110 % TDG nedenfor Hekni og Dam Tjurrmoen. Legger vi til standardfeilen i modellen bør vi ligge under 104,6 % for å være 95 % sikker at 110 % TDG aldri blir overskredet.

Scenario	Modell	TDG ndf dam Tjurrmo	TDG ndf Hekni
1a) Ingen endring  153 % TDG (Maksimum av gjennomsnitt gassbølger)		112,9 %	106,5 %
1b) Ingen endring  173 % TDG (Maksimum totalt)		117 %	108,9 %

2a) Utlegging av stein på 1, 6 km ndf. Brokke med 53 % økning av skjærspenning

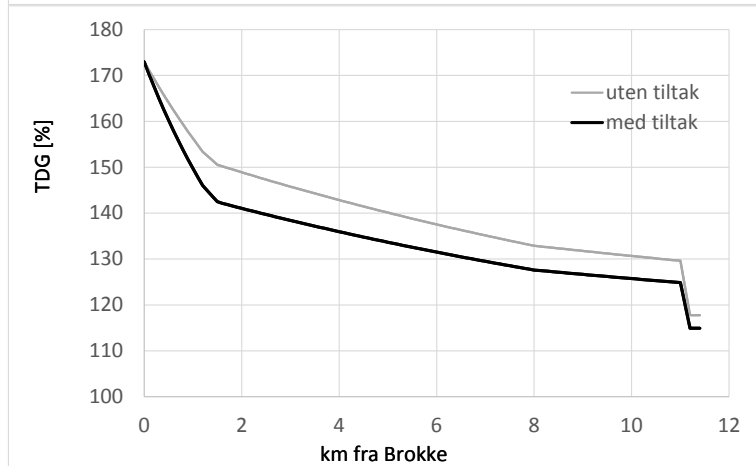
153 % TDG  
(Maksimum av gjennomsnitt gassbølger)



110,8 % 105,4 %

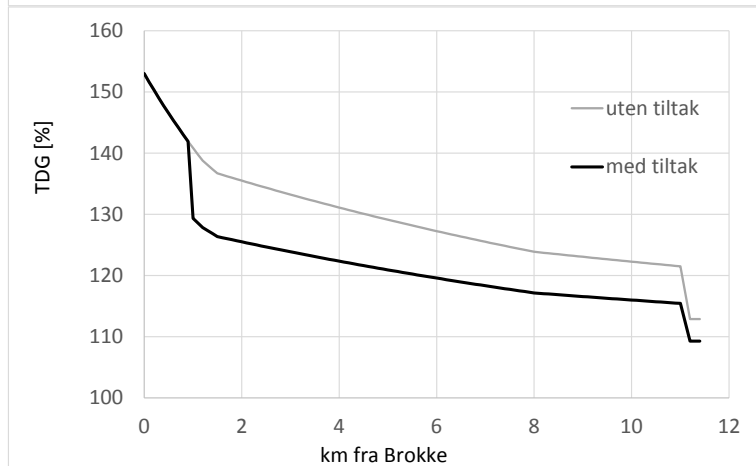
2b) Utlegging av stein på 1, 6 km ndf. Brokke med 100 % økning av skjærspenning

TDG = 173 %  
(Maksimum totalt)



114,9 % 107,5 %

3a) Diagonal terskel 1 km nedenfor Brokke med fritt dropp TDG = 153 % (Maksimum av gjennomsnitt gassbølger)



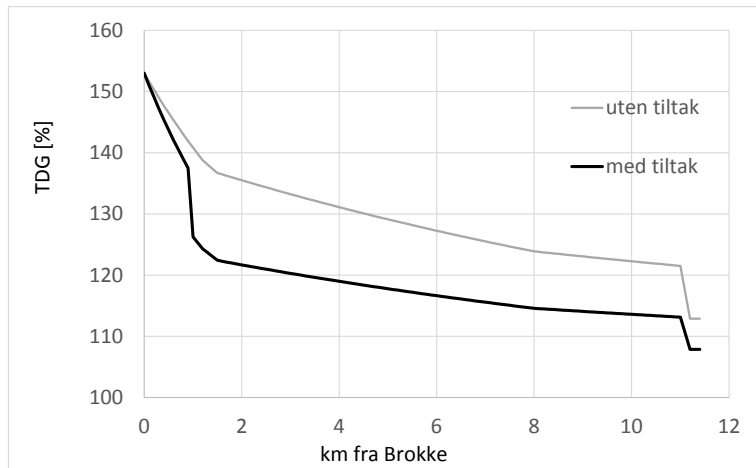
109,3 104,6



3b) Diagonal terskel 1 km nedenfor Brokke med fritt dropp

Og utlegging av stein

G0 = 153 %  
(Maksimum av gjennomsnitt gassbølger)

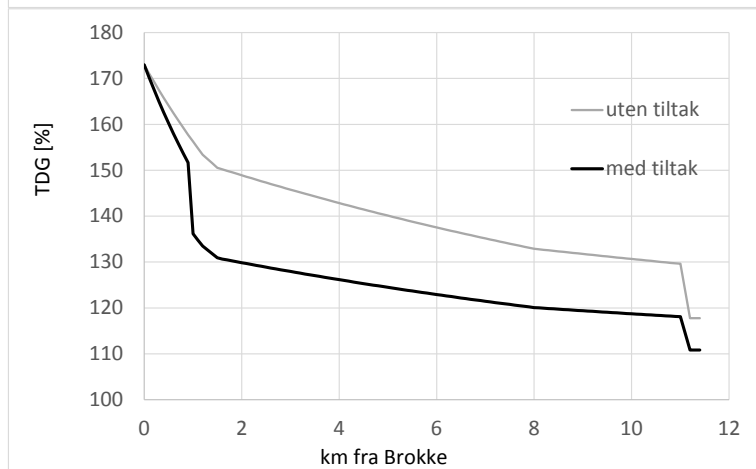


107,9 % 103,9 %

3c) Diagonal terskel 1 km nedenfor Brokke med fritt dropp

Og steinutlegg

TDG = 173 %  
(Maksimum totalt)



110,8 105,4

4) Diagonal terskel 1 km nedenfor Brokke med fritt dropp

Og steinutlegg

Og deflektor i dam Tjurrmo

G0 = 173 %  
(Maksimum totalt)

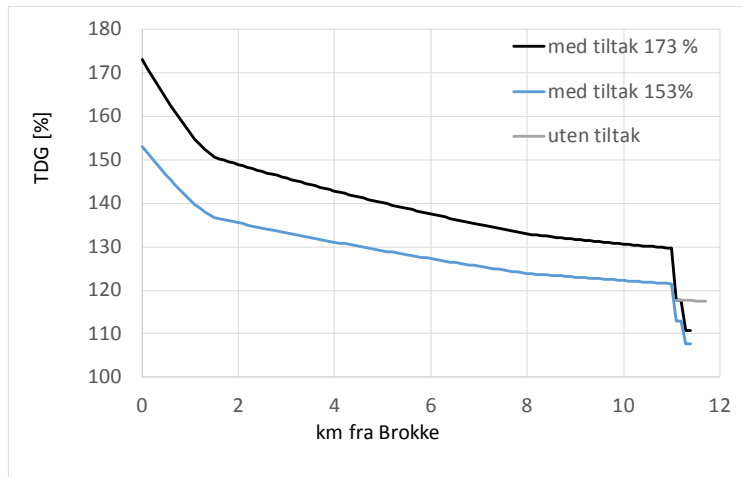


106,5 105,4

5) Bare ny deflektor i dam Tjurrmo

G0 = 173 %  
(Maksimum totalt)

G0 = 153 %  
(blått)  
(Maksimum av gjennomsnitt gassbølger)



v. 173%  
110,7      108,8  
v.153 %  
107,7      106,5

## 4 Diskusjon

### 4.1 Gassdata

I overvåkingsperioden 2016 – 2017 ble det igjen dokumentert gassovermetning i Otra. Toppene nådde verdier opp til 176 % ved Brokke kraftverk. Med verdier over 110 % kan det forventes akutte effekter på fisk (Heggberget et al., 1984; Jensen et al., 1986; Weitkamp, 2008) særlig i de områdene der fisk ikke kan kompensere ved å gå i dypet (176 % TGP kan først kompenseres fullstendig på ca. 7,6 m dyp). Effekten på miljøet er avhengig av varighet og dose. Kortvarige topper tolereres bedre enn langvarige, lave doser bedre enn høye (Pulg et al., 2016b). Det må gås ut i fra at strekningen mellom Brokke og Rysstadbassenget er særlig utsatt (fiskedød) men at også blekehabitat i minstevannføringsstrekningen nedenfor dam Tjurrmo og i perioder nedenfor Hekni er berørt.

Samlet gassovermetning (gjennomsnitt og median) var mindre i 2017 sammenlignet med 2016. Gassmetningen varierer gjennom året og mellom årene men har fellestrekk 2012-2017: I alle år finnes lange perioder (flere uker) med gassovermetning over 110 %. Toppene når rundt 170 %. Før 2017 var maksimalverdien 173 % og derfor ligger den i grunn i modellen. Overmetningsperioder faller sammen med vårløsning (flere uker) eller regnværsperioder (varierende lengde også kortvarig) med relativt mye vann i bekkinntakene. En nærmere beskrivelse finnes i Pulg et al. (2016).

### 4.2 Muligheter for avbøtende tiltak ved lufting av vann i elven

Målet med denne undersøkelsen var å finne ut om det lar seg gjøre å øke utgassing nedenfor Brokke slik at dagens Blekehabitat (nedenfor Dam Tjurrmoen) kan skjermes for gassovermetning over ca. 110 % (Pulg et al. 2016). Våre modeller og beregninger tyder på at dette i hovedsak er mulig. Dette er vist i scenario 3, 4 og 5. Selv om scenario 5 ligger litt over 110 % (110,7%) ved maksimalverdi så må det tas hensyn til at dette er en kortvarig topp og at det derfor mest sannsynlig kan tolereres. Standardfeilen indikerer likevel at episoder med høyere verdier ikke helt kan utelukkes ved maksimal scenariometning på 173 % fra Brokke. Det bør imidlertid innkalkuleres at en deflektor i Dam Tjurrmoen kan være mer effektivt ved høye metninger grunnet større trykkforskjell enn lagt til grunn (reduksjon med 40 % per dropp) samt at slike toppverdier er sjeldne og kortvarige. Med dette vil belastningen nedenfor Tjurrmoen mest sannsynlig være tolerabel for Bleke.

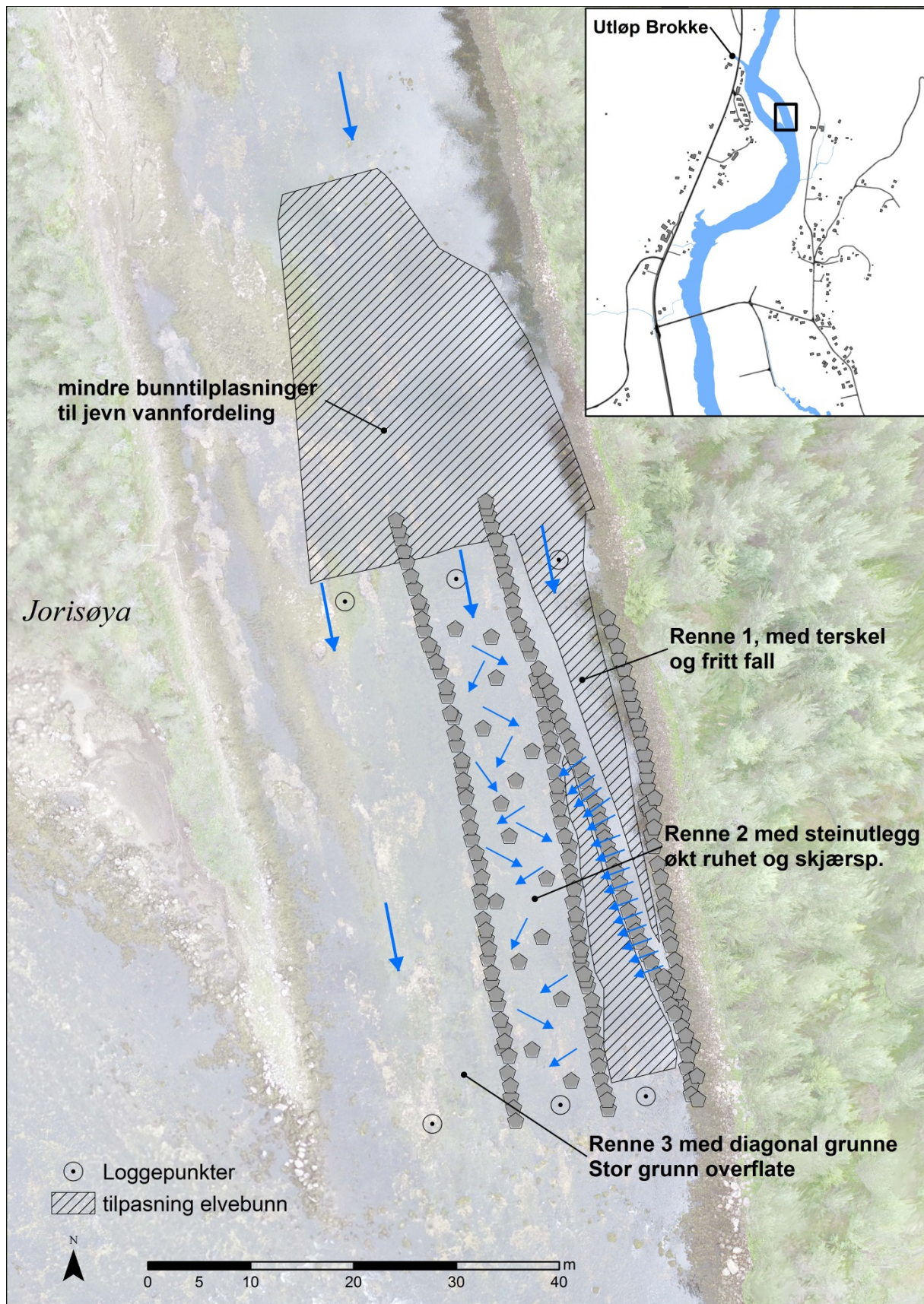
Kartleggingen viste at det er fysisk sett er rom for endringer i elvebunnen mellom Brokke og Rysstadbassenget. Samlet Høydeforskjell er 5,4 m (ved lav vannføring og vannivå på kote 242 i Rysstadbassenget). Elva er opptil 110 m bred.

Våre modeller gir et estimat om forventet effekt men vi vil likevel anbefale å teste utformingen i pilotforsøk, eventuelt i mindre målestokk siden dette vil kunne validere modellene og gi en sikrere vurdering. Basert på resultatene foreslår vi å teste tre forskjellige

løsninger. 1. En deflektor i dam Tjurrmo. 2. Steinutlegg nedenfor Brokke som øker skjærspenningen og 3. en terskel med fritt dropp nedenfor Brokke. Ett års overvåking vil vise hvordan disse løsningene vil fungere under forskjellige forhold og med de forekommende gassmetningene. Felles for løsningsalternativene er at vi kan forvente en effekt på utgassing og at de fysisk kan utformes i elven mellom Rysstadbassenget og utløp Brokke, samt Tjurrmoen dam. Pilotforsøk nedenfor Brokke kan utføres i det østre løpet nedenfor Brokke (øst for Jorisøya). Der kan det etableres 2 midlertidige renner der tiltakenes effekt samt en referanse kan testes (se planskisse ndf.).

Pilotforsøk med deflektor er påbegynt til skrivende stund (1 dag) og de første 16 timer med logging viser en reduksjon fra 105,4 % til 102 % (63 % reduksjon, ca. 0,4 per dropp som modellert).

Kraftverk Hekni har redusert gassmetning i driftsvann betydelig (70% i snitt) i de store gassbølgene som ble brukt i utgassingsmodellen. Det finnes imidlertid også mindre gassbølger som ikke ble redusert vesentlig. Dette bør utredes nærmere ved å sammenligne driftssituasjon detaljert med gassdata ovenfor og rett nedenfor Hekni. Dette vil belyse risiko for miljøeffekter nedenfor Hekni, men her kan det også ligge en løsning for reduksjon av gassmetning, dersom visse driftssituasjoner bidrar til det.



Figur 7 Forslag for test av utgassingsløsninger sommer 2018.

### Løsningsalternativ 1) Fritt overløp

Dersom vannet ledes over en bred terskel med fritt overfall av vannet og dersom utlufting er i samme størrelsesorden som ved Dam Tjurrmoen og i Vetlefjordelva, kan det forventes en reduksjon av gassmetningen på mellom 30 og 40 %. En sån terskel bør stilles på skrått i elveløpet slik at den er bredest mulig. Ved flomvannføringer vil den være oppstuet nedenfra og virke i mindre grad, men da vil overmetningen uansett være uttynnet av vannmassene i restfeltet. En sån terskel kan bygges både midlertidig i sideløpet og også i større målestokk og varig i hovedløpet. Imidlertid vil den fremstå som et kunstig element i elvemorfologien.



En terskel er et kunstig morfologisk element, men ikke uvanlig i regulerte elver.

### Løsningsalternativ 2) Økt ruhet

Dersom ruheten økes med varierte steinutlegg (1-2 m) øker skjærspenningen og med dette kan det forventes en økt utgassing. Steinutlegg kan gjennomføres både midlertidig i sideløpet og også i større målestokk i hovedløpet. Det kan utformes slik at det ikke vil fremstå som kunstig element i elvemorfologien.



Naturlig elvestrekning i Espedalselva med varierte glasiale storstein

### **Anslått massebehov for testkjøring:**

250 store steinblokker 1-2 m diameter, gjerne kantet sprengstein. Steinene brukes for å skille rennene sammen med stedeagne blandete masser. Alternativt kan betongelementer brukes. Disse må imidlertid være høy nok for å stikke ca. 30 cm opp av vannet opptil ca. 150 m<sup>3</sup>/s.

Stedeagne masser genereres ved arrondering av løpet til jevn fordeling mellom rennene, samt utforming av testdesignet innad i rennene. Massene brukes for å tette voller/steinrekker mellom rennene. Mest sannsynlig er stedeagne masser egnet til dette, men siden vi ikke har gravd der er det litt usikkerhet knyttet til det. Hvis massene ikke er tilstrekkelig er det behov for blandete masser 0-50 cm.

**Reversibel:** Utformingen er reversibel og alle masser kan fjernes etter forsøket, eller brukes for et utluftingsdesign.

**Gasslogging:** Forsøket krever 5 loggere med to målepunkter. 1 Logger utløp Brokke (som nå). 3 loggere ved forsøksrenne og en logger nedstrøms (Dam Tjurrmoen). 230 V strømforsyning er gunstig men ikke nødvendig, dersom det brukes batteriloggere og det inkluderes oppsyn og batteribytte.

**Vannføringslogging:** Forsøket krever nøyaktig vannføringslogging minst på timesnivå og på samme nivå som i dag.

**Tidsrom:** Det anbefales å utforme forsøksrennene ved lav vannføring. Trolig er det mulig om sommeren 2018. Når massen tilkjøres i forkant og med egnete maskiner regnes med 4-5 dager arbeid. Deretter logges så lenge at nok gassovermetningsbølger har blitt observert. Det regnes med 2-4 måneder. En utvidelse til vårløsningen 2019 når det vanligvis er de høyeste og mest langvarige gassmetningsepisoder kan vurderes. På denne måten kan en worst-case scenario integreres.

**Leveranse:** Basert på resultatene og modellvalidering beregnes hvilken effekt en oppskalert løsning ville ha og hvordan den bør utformes. Så kan det vurderes om og når den realiseres.

### **Løsningsalternativ 3) - Deflektor i dam Tjurrmo**

En deflektor (mellomtrinn) under slippeluken for minstevann vil kunne øke utluftingen av vannet ved å øke energiomvandlingen i luften, ved å øke vann-luft-kontaktoverflaten samt ved å redusere hydrostatisk trykk i sprøytesonen. En konkav, skjeformet overflate vil bidra til en god fordeling av vannet og mye vann-luft kontakt. Etter utformingen foreslått i tegningen nedenfor forventes en utlufting tilsvarende:

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

$G_0$  : Utgangsgassmetning i %

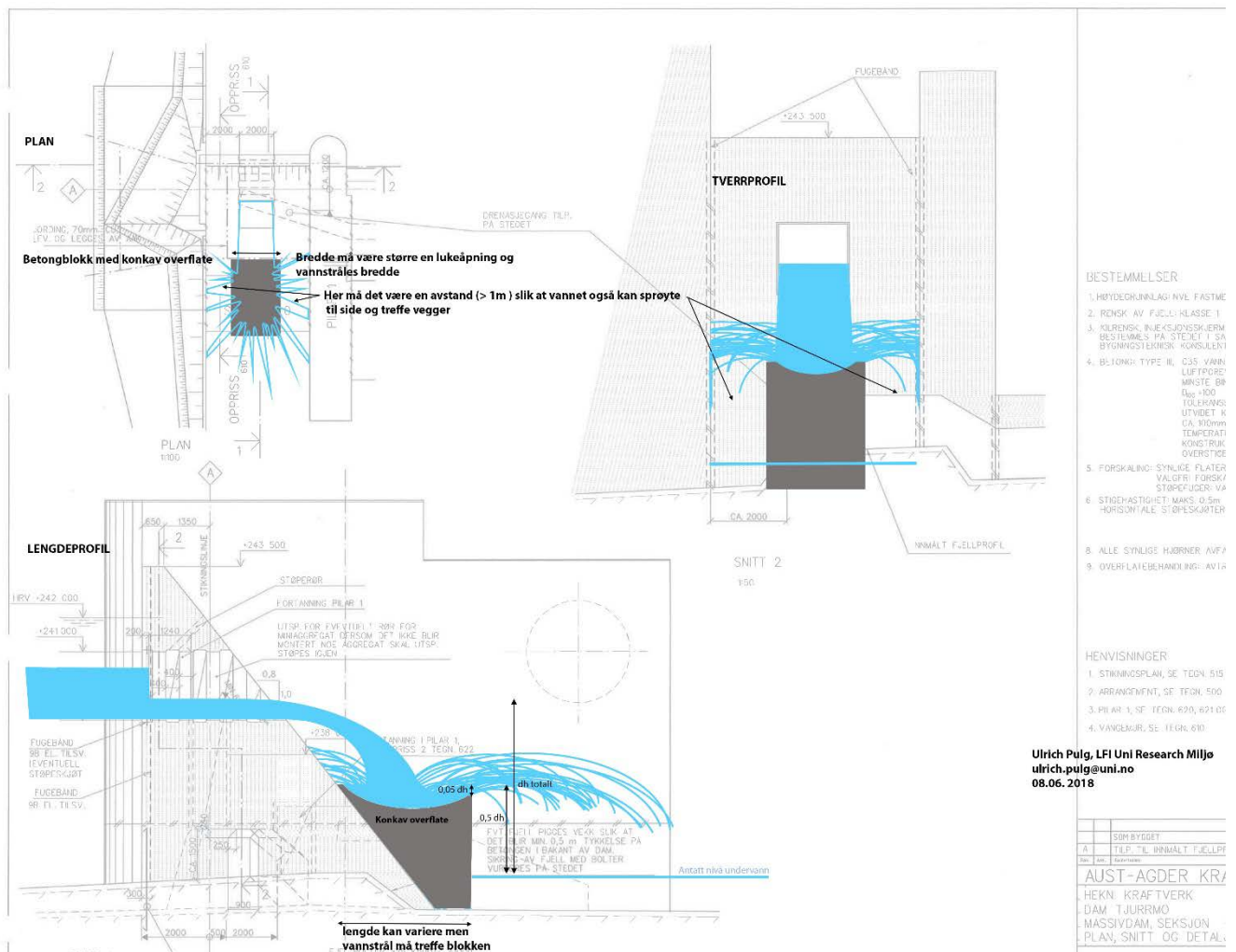
$G_e$  : gassmetning etter droppene i %

n: Antall dropp

Med to dropp forventes at gassovermetning reduseres til 36 % av den opprinnelige overmetningen. Med ett dropp (før-situasjon) reduseres overmetningen til 60 %. En løsning for en slik deflektor ble utformet av Uni Miljø LFI i juni 2018 (Figur 9). AE og Otra kraft har tilpasset og prosjektert deflektoren som ble installert 4. 10. 2018.

Første målinger etter 16 timer indikerer at metningen i snitt ble redusert fra 105,4 % til 102 %. Overmetningen ble altså redusert med 63 % til 37 %, nærmest som modellen forutsa. Ved høyere gassmetninger (116 %) ble metningen etter deflektoren redusert til 103-104 %. Dette tilsvarer en reduksjon i overmetning på minst 75 % og kan forklares ved større trykkforskjell og økt utgassing.

Før man kan konkludere og ev. tilpasse modellen bør det samles flere data inkludert de gassbølgene med høy overmetning samt bølger ved forskjellige vanntemperaturer. Det er planlagt med ett års overvåking.



Figur 8 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.





Figur 9 Deflektoren etter installasjon i dam Tjurrmo, med og uten vann. Første testkjøringer indikerer en reduksjon av gassovermetning med 63-75 %.

## 5. Litteratur

Beeman JW, Maule AG (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: 584-594.

Canadian Council of Ministers of the Environment. 1999. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: Dissolved gas supersaturation. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.

Gabrielsen S.-E., Barlaup B.T., Halvorsen G. A., Sandven O.R., Wiers T., Lehmann G.B., Skoglund H., Skår B., Wiers T., Pulg U., Vollset K. (2012), "LIV" – Livet i vassdragene. Langsiktige undersøkelser av laks og sjøaure i Modalselva i perioden 2006 – 2011, LFI-rapport nr. 188.

Heggberget TG (1984) Effect of Supersaturated Water on Fish in the River Nidelva, Southern-Norway. *Journal of Fish Biology* 24: 65-74.

Jensen, J. O. T., Schnute, J., and D. F. Alderdice. 1986. Assessing juvenile salmonid response to gas supersaturation using a general multivariate dose-response model. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 43(9): 1694-1709

Pulg, U., Gabrielsen S.-E. og Normann, E.S. (2013), Gassmetning i tre LIV-elver, Matreelva, Modalselva og Vossovassdraget, LFI notat 11/2013.

Pulg, U., Barlaup, B.T., Velle, G., Normann, E, Lehmann, G. 2014: Hydropower induced supersaturation - not in European rivers? Presentation at the 10<sup>th</sup> International Symposium on Ecohydraulics, NTNU Trondheim, June 23<sup>rd</sup>-27<sup>th</sup> 2014.

Pulg U. og Stranzl S. (2015), Gassmetning i Vetlefjordselva ved Mel kraftverk. Technical Report no. 258. Bergen, Norway: Uni Research Miljø LFI

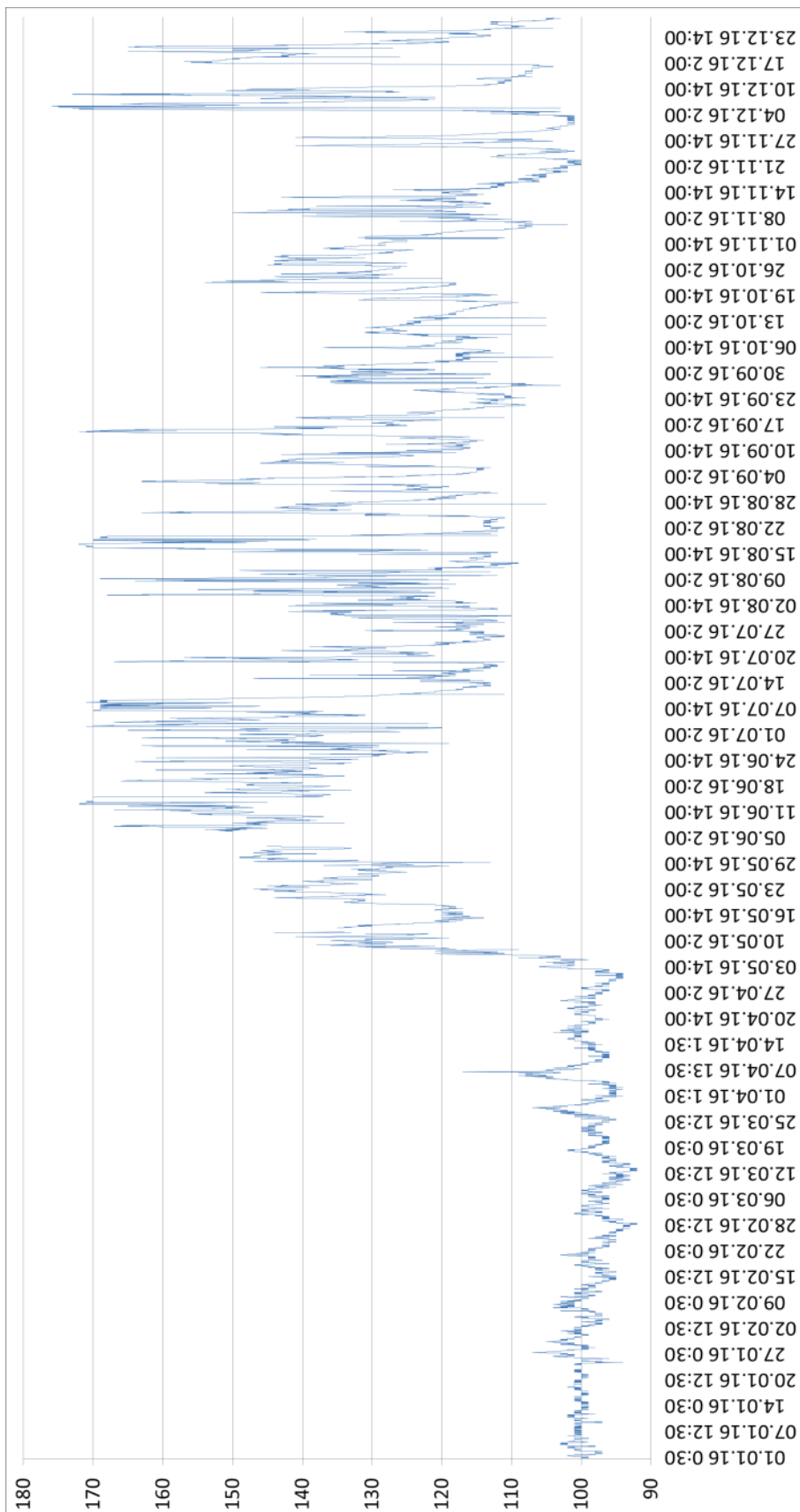
Pulg, U., Sebastian Stranzl, Knut Wiik Vollset, Bjørn Torgeir Barlaup, Espen Olsen, Bjørnar Skår, Velle., G., 2016a. Gassmetning i Otra nedenfor Brokke kraftverk. . LFI-rapport nr. 217. Uni Research Miljø LFI, Bergen, 67.

Pulg, U., Vollset, K.W., Velle, G., Stranzl, S., 2016b. First observations of saturopeaking: Characteristics and implications. *Sci Total Environ* 573, 1615-1621.

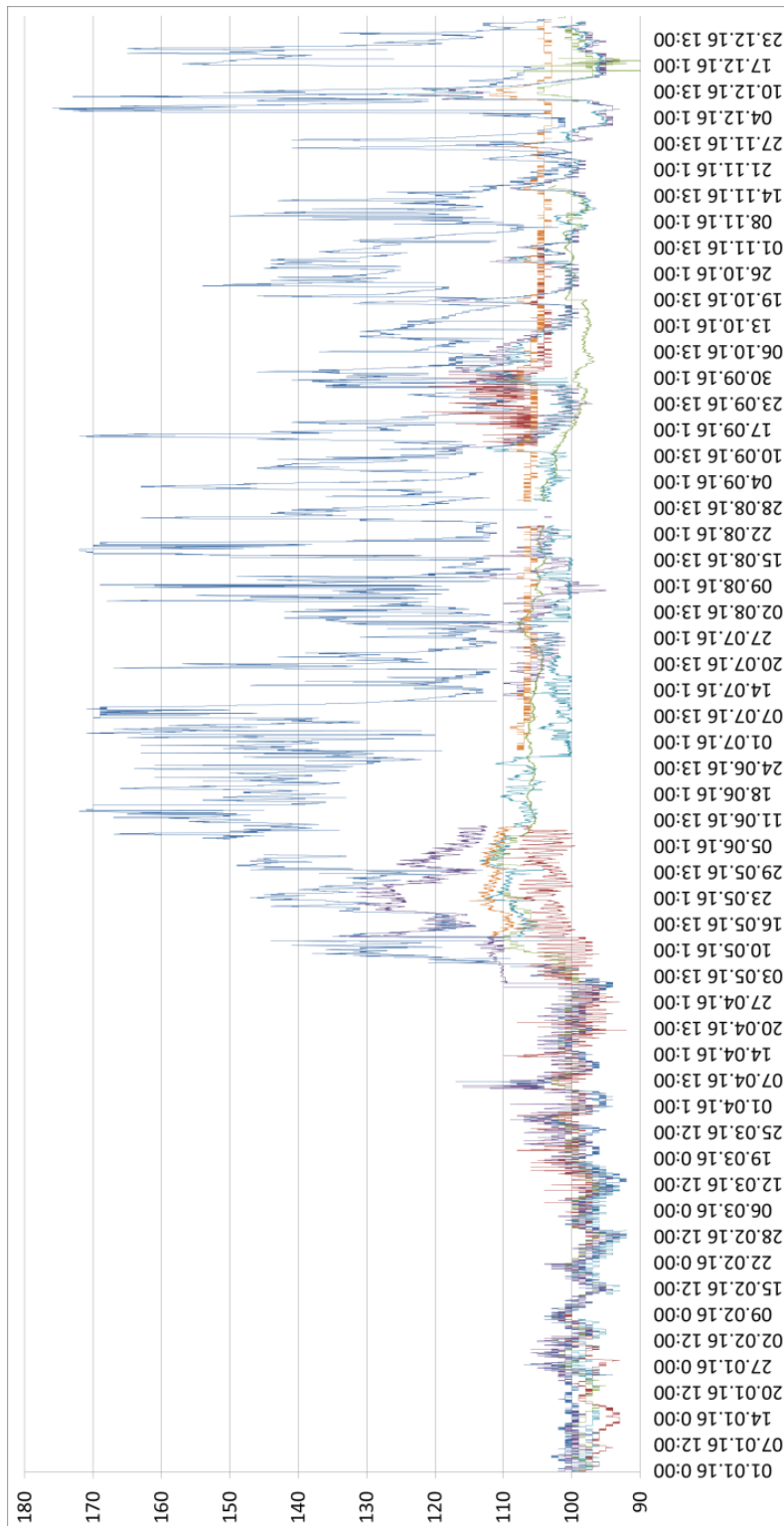
Stokkebø G, Berdal B, Brox G, Fleischer E, Guttormsen G, Kjeldsen A, Tvinnereim K (1986) Bekkeinntak på kraftverkstunneler. Sluttrapport fra Bekkeinntakkomiteen (in Norwegian). Asker: Vassdragsregulantenenes forening.

Weitkamp DE (2008) Total dissolved gas supersaturation biological effects, review of literature 1980-2007. Bellevue, Washington: Parametrix, 65.

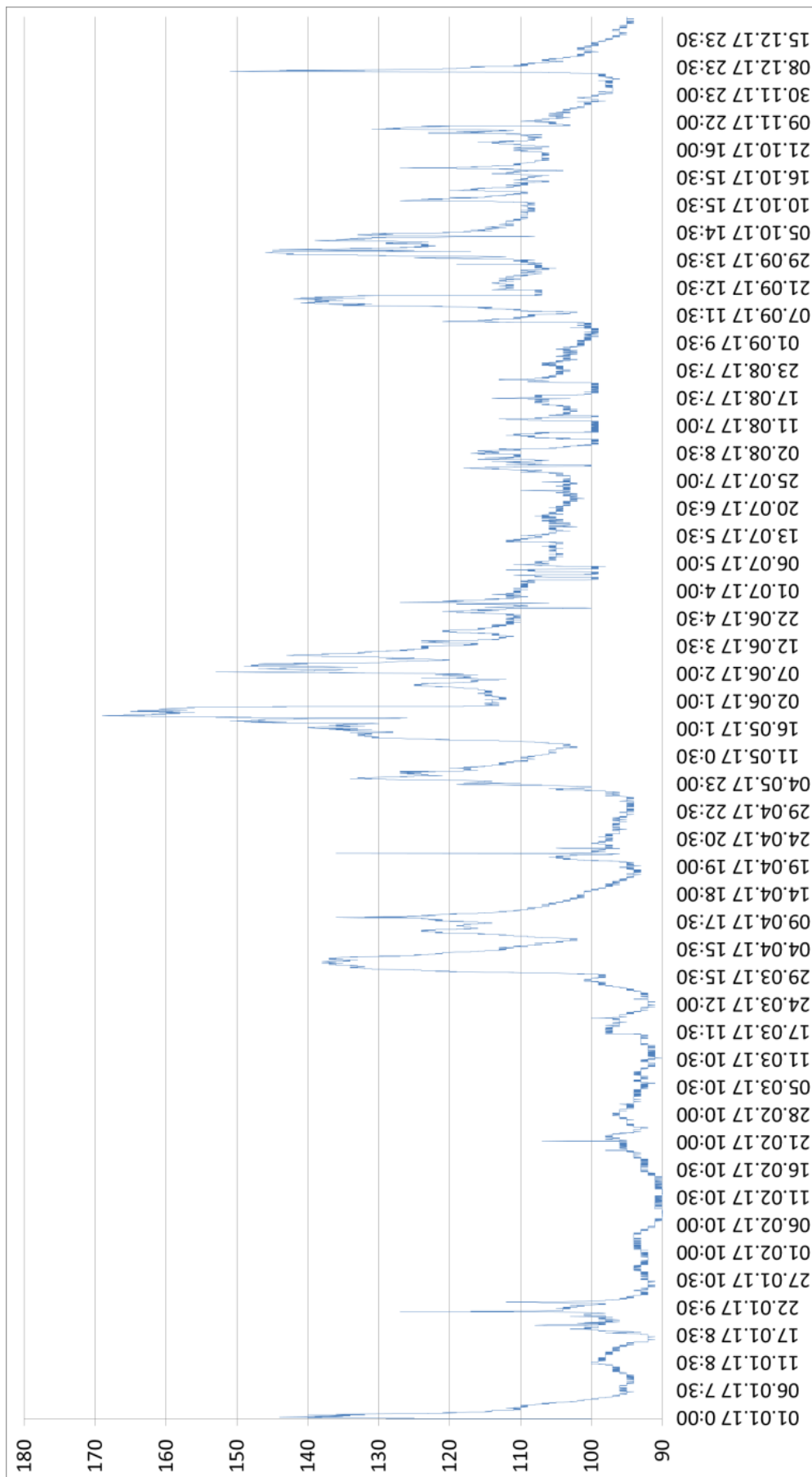
## Vedlegg med større figurer



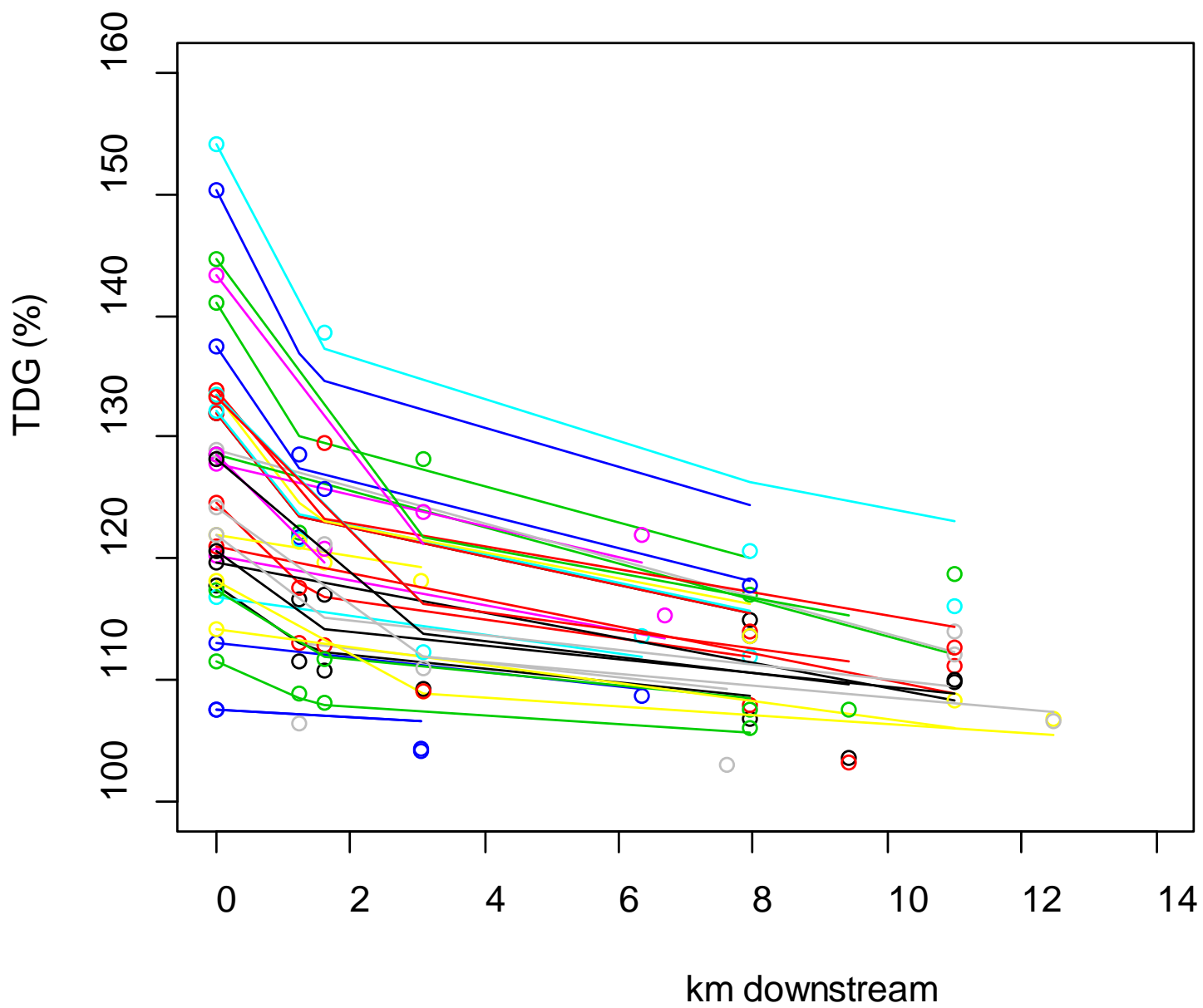
Figur 2: Gassmetning (TGP) målt i prosent ved utløpet av Brokke kraftverk i perioden 01.01.2016 – 31.12.2016.



**Figur 3: Gassmetning (TGP) målt i prosent ved alle stasjonene i overvåkingsperioden 01.01.2016 – 31.12.2016. Blå linje viser utløpet av Brokke kraftverk, lilla linje viser stasjonen ovenfor tjurrmoen (11 km nedstrøms Brokke), oransje linje viser stasjon nedenfor Tjurrmoen (11,2 km nedstrøms Brokke), turkis linje viser stasjon ved Utløp Hekni (19km nedstrøms Brokke), rød linje viser stasjon ovenfor Blekeløpet (19,2 km nedstrøms Brokke) og den grønne linjen viser stasjonen ved pH-stasjon (30 km nedstrøms Brokke).**



Figur 4: Gassmetning (TGP) målt i prosent ved utløpet av Brokke kraftverk i perioden 01.01.2017 – 20.12.2017.



Figur 4: Modellert gassovermetning i Otra (linjer) versus observert utgassing (punkter)

