

nr. 1/2015

FISKEN OG HAVET

Omsetning av tilført partikulært organisk materiale i fjordbasseng med dype terskler

Av Jan Aure



HAVFORSKNINGSINSTITUTTET
INSTITUTE OF MARINE RESEARCH

Omsetning av tilført partikulært organisk materiale i fjordbasseng med dype terskler


Av
Jan Aure



Bergen, mars 2015

Innholdsfortegnelse

1	Sammendrag.....	7
2	Bakgrunn og observasjoner.....	8
3	Resultater og diskusjon	11
	3.1 Fjorder med terskeldyp $H_t \leq 50$ meter	11
	3.2 Fjorder med terskeldyp $H_t \geq 60$ m	12
	3.3 Fjorder med terskeldyp 5 - 200 m.....	14
4	Eksempel fiskeoppdrett Hardangerfjorden	16
5	Referanser	18

PROSJEKTRAPPORT		Distribusjon: Åpen
 HAVFORSKNINGSINSTITUTTET <i>INSTITUTE OF MARINE RESEARCH</i> Nordnesgaten 50, Postboks 1870 Nordnes, 5817 BERGEN Tlf. 55 23 85 00, Fax 55 23 85 31, www.imr.no		HI-prosjektnummer ERA 14324
		Oppdragsgiver(e): Norges forskningsråd/ Havforskningsinstituttet
		Oppdragsgivers referanse:
		Dato: 26. mars 2015
Tromsø Flødevigen Austevoll Matre 9294 TROMSØ 4817 HIS 5392 STOREBØ 5984 MATREDAL Tlf. 55 23 85 00 Tlf. 37 05 90 00 Tlf. 55 23 85 00 Tlf. 55 23 85 00		
Rapport: Fisken og havet	Nr 1-2015	Program: Akvakultur
Tittel (norsk/engelsk): Omsetning av tilført partikulært organisk materiale i fjordbasseng med dype terskler		Forskningsgruppe: Oseanografi og klima
Forfatter: Jan Aure		Antall sider totalt: 18
Sammendrag (norsk): Utviklingen i fiskeoppdrettsnæringen har ført til at økende antall anlegg blir lokalisert over dypere vann i store fjordområder. Dette medfører at de organiske partikulære utslippene fra fiskeoppdrett (fekalier og forspill) i større grad sedimenterer under terskeldypet i store fjorder. Store fjorder har som regel dypere terskler (> 100 m), men det er begrenset kunnskap om naturlig oksygenforbruk og dermed tilførsel og omsetning av labilt karbon (F_c $gC/m^2/måned$) i denne type fjordbasseng. Til forskjell fra fjorder med terskeldyp mindre enn ca 50m, hvor F_c avtar med økende terskeldyp ned til ca 50-60m, var det en økning av F_c for fjordbasseng med terskeldyp større enn 60-100m. F_c økte fra ca 2 $gC/m^2/måned$ i ca 60 m dyp til ca 14 $gC/m^2/måned$ i ca 200m dyp. F_c økte lineært med økende saltholdighet i bassengvannet, og dette tyder på økt innblanding av Atlantisk vann. Den økte tilførsel og omsetning av labilt organisk materiale (F_c) i fjordbasseng med terskeldyp mellom ca 60 og 200 m er trolig knyttet til den relativt høye primærproduksjonen i atlantisk vann (Golfstrømmen, Nord - Atlantiske drift) som strømmer inn i Norskehavet /Nordsjøen og lagrer seg inn under den norske kyststrømmen. I et eksempel fra Hardangerfjorden med terskeldyp på ca 180m og midlere bassengdyp på ca 260m, er det beregnet at en fiskeproduksjon på ca. 50 000 tonn per år, med 20 % forspill (maksimalt) over fjordbassenget vil føre til at midlere oksygenminimum reduseres fra ca 5 ml/l til ca. 4,95 ml/l, dvs. med ca 1,3 %. Den marginale effekten på oksygenforholdene i Hardangerfjord-bassenget med økte tilførsler av organisk materiale fra fiskeoppdrettet er et resultat både av det store bassengvolumet og den relativt høye naturlige tilførsel/omsetning av organisk materiale i fjordbasseng med dype terskler.		

Summary (English):

In Norway an increasing number of fish farms are located in large fjords with deeper sills. This results in increased supply of organic matter to the fjord basins. Compared to fjord basins with sill depths shallower than about 50 meter, supply of organic material (Fc) into the fjord basins increased from about 2 gC/m²/month at sill depth 60 meter to about 14 gC/m²/month at sill depth of 200 meter. This increase was most likely due to the higher primary production (about three times) in the Atlantic Water inserted below the less productive Norwegian Coastal Water at 100-200 meter depth. An example is presented for the Hardangerfjord on the influence of organic waste from fish farming (production 50.000 tons per year) on the oxygen consumption in the fjord basin. With sill depth of 180 m and mean basin depth of 260 m, it is calculated that the oxygen consumption will increase about 1.3 %. This modest increase was both a result of the immense basin volume and the relatively high natural supply/turnover of organic material (Fc) into the basin water.

Emneord (norsk):

Fjordbasseng, oksygen, organisk omsetning, fiskeoppdrett

Subject heading (English):

Fjord basins, oxygen, organic turnover, fish farming

1 Sammendrag

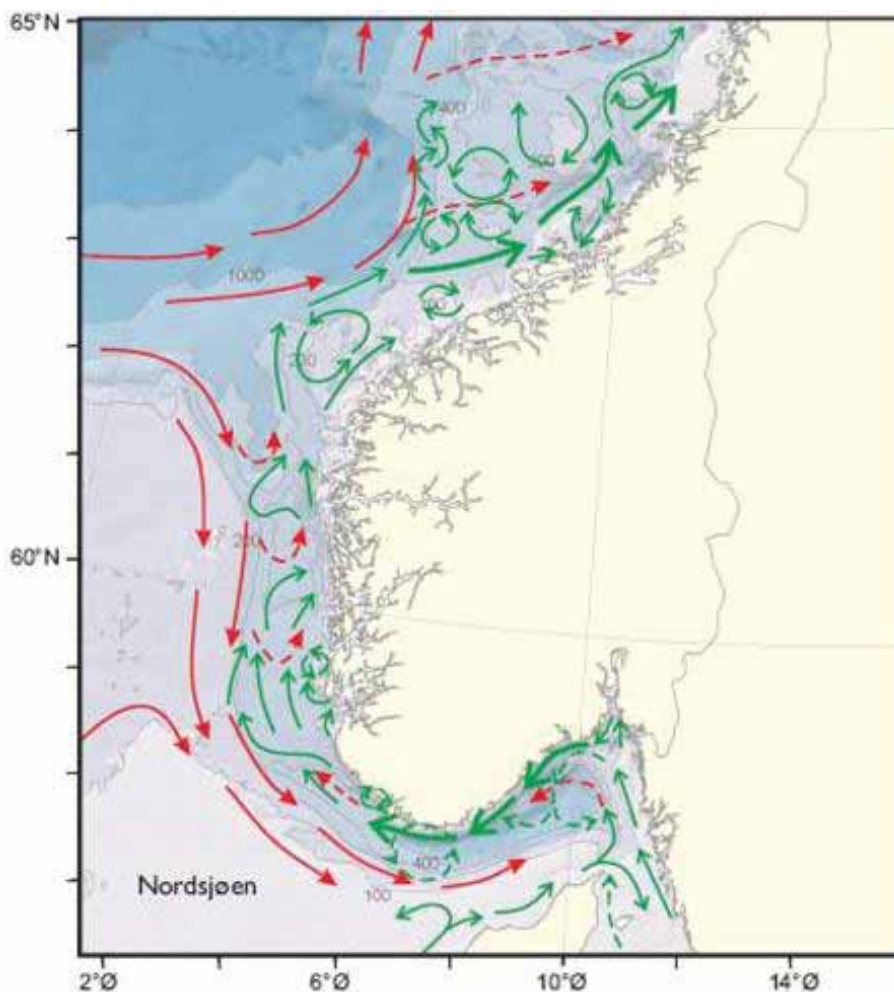
Store fjorder har som regel dypere terskler (> 100 m), men det er begrenset kunnskap om naturlig oksygenforbruk og dermed tilførsel og omsetning av labilt karbon (oppløst og partikulært organisk materiale, DOC og POC) i denne type fjordbasseng. I denne undersøkelsen er beregning av tilførselen (omsetningen) av marint organisk materiale (F_c , $\text{gCm}^{-2}\text{måned}^{-1}$) basert på hydrografiske data og oksygenmålinger fra 8 fjord og kyst basseng mellom Ytre Oslofjord og Trondheimsfjorden, med terskler dypere enn ca 60 meter. Tidligere undersøkelser viser at tilførselen/omsetningen av marint organisk materiale (F_c) i fjordbassengene avtar tilnærmet lineært fra ca $5 \text{ gCm}^{-2}\text{måned}^{-1}$ for terskeldyp ca 5 m til ca $2 \text{ gCm}^{-2}\text{måned}^{-1}$ for terskeldyp på ca 50m.

Til forskjell fra fjorder med terskeldyp grunnere enn ca 50m, hvor F_c ble redusert med økende terskeldyp, var det en økning av F_c for fjordbasseng med terskeldyp dypere enn ca 60-100 m. F_c økte tilnærmet lineært med økende saltholdighet i bassengvannet, og dermed økt innblanding av Atlantisk vann, fra ca $2 \text{ gC/m}^2\text{måned}$ i ca 60 m dyp til ca $14 \text{ gC/m}^2\text{måned}$ i ca 200 m dyp. F_c - verdiene ($5\text{-}2 \text{ mgC/m}^2\text{måned}$) i de øverste 50m er knyttet til den lokale primærproduksjonen i kystvann og fjorder og er betydelig mindre enn F_c - verdiene i fjorder med terskler dypere enn 60 - 100 m dyp. I en fjord med terskeldyp på ca 200 m er for eksempel F_c - verdien ca 4 ganger større enn for en fjord med terskeldyp på ca 30m. Den økte tilførsel og omsetning av partikulært organisk materiale (F_c) i fjordbasseng med terskeldyp mellom ca 60 og 200 m, med økende innblanding av Atlantisk vann, er trolig knyttet til den relativt høye primærproduksjonen i atlantisk vann (Golfstrømmen, Nord - Atlantiske drift) som strømmer inn i Norskehavet og Nordsjøen og lagrer seg inn under den norske kyststrømmen på 100-200 m dyp. Dette viser at bidraget fra en gitt menneskeskapt organisk belastning (F_{cm}) til den naturlige tilførsel/omsetning av organisk materiale (F_c), (F_{cm}/F_c) avtar tildels betydelig for terskeldyp større enn 60 -100 m.

Utviklingen i fiskeoppdrettsnæringen har ført til at økende antall anlegg blir lokalisert over dypere vann i store fjordområder. Dette medfører at de organiske partikulære utslippene fra fiskeoppdrett (fekalier og forspill) i større grad sedimenterer under terskeldypet i store fjorder. I Hardangerfjorden med terskeldyp på ca 180 meter vil en fiskeproduksjon på ca. 50.000 tonn per år, med 20 % partikulært organiske utslipp (maksimalt) over fjordbassenget føre til at midlere oksygenforbruket øker med maksimalt ca. 6 %, og midlere oksygenminimum reduseres fra ca 5 ml/l til ca. 4.95 ml/l, dvs. med ca 1.3 %. Den marginale effekten av økte tilførsler av organisk materiale fra fiskeoppdrettet på oksygenforholdene i Hardangerfjordbassenget skyldes både det store bassengvolumet og den relativt høye naturlige tilførsel/omsetning av organisk materiale i fjordbasseng med dype terskler.

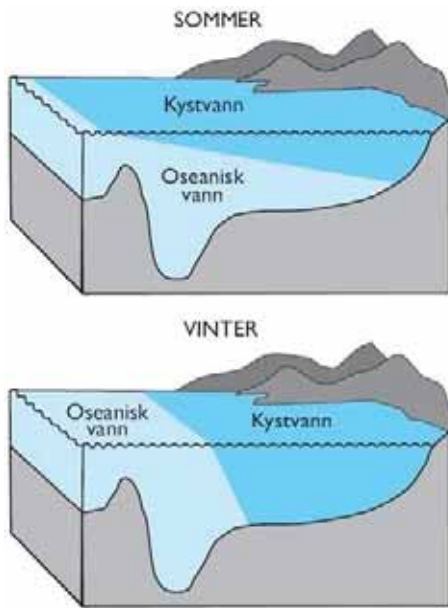
2 Bakgrunn og observasjoner

Fjordene kan betraktes som et minihav hvor de marine forholdene hovedsakelig reflekterer de marine egenskaper og viktigste prosesser i kyststrømmen. Det relativt saltfattige kystvannet utenfor norskekysten føres nordover av Den norske kyststrømmen som har et kileformet tverrsnitt (Figur 1 og 2). Kyststrømmen har sin opprinnelse fra Østersjøen, sørlige Nordsjøen og ferskvannsavrenning fra land langs norskekysten. Kystvannet blandes med atlantisk vann, som kommer inn mellom Færøyene og Shetland. Deler av det innstrømmende salte atlantiske vannet (oseanisk vann) presses under kystvannet og strømmer nordover i 100 – 200 m dyp under den norske kyststrømmen (Figur 1 og 2).



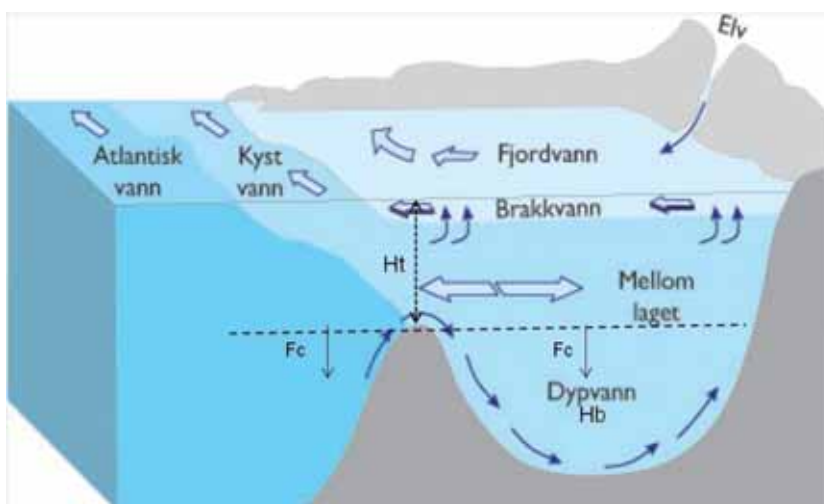
Figur 1.
Hovedstrømsystemene i havområdet utenfor Sør-Norge. Røde piler: atlantisk vann, grønne piler: kystvann.

Det er klare årstidsvariasjoner i kyststrømmens egenskaper og utbredelse. Den såkalte ”kystvannskilen” er bred og grunn om sommeren og smal og dyp om vinteren (Figur 2). Det salte og tunge atlantiske vannet ligger altså høyere om sommeren og det er derfor på denne tiden at vi vanligvis får innstrømming til fjordbasseng med dype terskler. I øvre lag er vannet tyngst om vinteren pga lavere temperaturer og høyere saltholdigheter og innstrømming av kystvann til fjordbasseng med grunne terskler skjer derfor oftest på denne årstiden (Sætre, 2007).



Figur 2. Kystvannskilen i kyststrømmen, sommer og vinter (Oseanisk vann = atlantisk vann).

Utviklingen i fiskeoppdrettsnæringen har ført til at økende antall anlegg blir lokalisert over dypere vann i store fjordområder. Dette medfører at de organiske partikulære utslippene fra fiskeoppdrett (fekalier og forspill) i større grad sedimenterer under terskeldypet i store fjorder. Store fjorder har som regel dypere terskler (> 100 m), men det er begrenset kunnskap om naturlig oksygenforbruk og dermed tilførsel og omsetning av labilt karbon (oppløst og partikulært organisk materiale, DOC og POC) i denne type fjordbasseng. Oksygenforbruk i fjordbasseng kan beregnes med modellen FjordEnv (Stigebrandt 2001, ancylus.net) for vurdering av økt belastning av organisk materiale fra fiskeoppdrett (Figur 3). Beregningene er basert på data i fjordbasseng med terskler grunnere enn ca 50 m (Aure og Stigebrandt 1989), mens det er begrenset tilgang på regelmessige oksygenmålinger gjennom året fra fjordbasseng med dype terskler langs norskekysten. Oksygenmålinger gjennom minst en årssyklus er vanligvis nødvendig for å kunne beregne midlere oksygenforbruk og dermed tilførsel og omsetning av organisk materiale i et fjordbasseng. Beregnet tilførsel og omsetning av labilt partikulært organisk materiale (F_c) i fjordbasseng med dype terskler kan eventuelt implementeres i modellen FjordEnv.



Figur 3. Hovedtrekkene i vann-utskiftning kyst - fjord. H_t (m) = Terskeldyp, Midlere bassengdyp H_b (m) = $\text{Volum dypvann} / \text{Areal}_{\text{terskel}}$. F_c = Tilførsel og omsetning av marint organisk materiale i fjordbassenget (dypvann) ($\text{gC m}^{-2} \text{måned}^{-1}$).

Tabell 1. Måleperioder, areal i terskelnivå A_{terskel} (km²), terskeldyp H_t (m) og midlere bassengdyp H_b (m) = Volum basseng/ A_{terskel} , for fjord/kystbassengene angitt i tabellen. (H_t =140m - lokal terskel i Beistadfjorden).

Fjord/kyst basseng	Måleperiode	Arealterskel (km ²)	Ht (m)	Hb (m)
Skagerrakbassenget	1955-1991	18000	270	116
Ytre Oslofjord (Rauøybassenget)	1960-2006	99.2	120	114
Ærøydypet	1960-1980	4.8	60	31
Hardangerfjorden	1955/56,1972	445	180	260
Byfjordsystemet (Bergen)	1956-2003	125	135	200
Ytre Trondheimsfjord	1998-2001	350	200	164
Indre Trondheimsfjord	1998-2001	200	100	137
Beistadfjorden	1998-2001	200 (H_t =140m)	100	42 (H_t =140m)

For beregning av tilførsel og omsetning av labilt karbon er det benyttet data fra 8 fjord/kyst basseng med terskler dypere enn ca 60 m (se tabell 1) :

- Skagerrakbassenget har blitt observert regelmessig mellom 1955 og 1991. Terskeldypet mot Norskehavet er ca 270 m og midlere bassengdyp er ca 116 m (Aure and Dahl, 1994). Datakilde: Havforskningsinstituttet .
- I Ytre Oslofjord (Rauøybassenget) er det god dekning av data og da spesielt etter 1995 hvor oksygenforholdene i bassenget er blitt observert gjennom hele året (Aure, Danielssen og Naustvoll, 2014). Rauøydypet har en terskel ut mot Skagerrak på ca 120 m og midlere bassengdyp er ca 114 m. Datakilde: Havforskningsinstituttet - Forskningsstasjon Flødevigen, Arendal.
- *I Ærøydypet nær Arendal er terskeldypet ca 60 m og midlere bassengdyp på 31m. Det er benyttet data i perioden 1960-1980. Etter 1980 var en betydelig økning av den organiske belastningen i fjordbassengene langs Skagerrakysten med terskeldyp mindre enn ca 60 m grunnet økte tilførsler av organisk materiale fra sørlige Nordsjøen (Aure, Danielssen and Sætre, 1996). Datakilde: Havforskningsinstituttet.
- I Hardangerfjorden er det det forholdsvis begrenset med målinger av oksygenforholdene gjennom året i bassengvannet, men det er skaffet tilveie regelmessige observasjoner fra årene 1955/56 og i 1972. Hardangerfjorden har et terskeldyp på ca 180 m og midlere bassengdyp er ca 260 m. Datakilde: Universitetet i Bergen (UIB) – Geofysisk institutt.
- Terskeldypet til Byfjordsystemet (Bergen) er ca 125 m og midlere bassengdyp er ca 200 m. I Byfjordsystemet (Bergen) er det benyttet oksygendata for perioden 1956-2003. Datakilde: Universitetet i Bergen (UIB) - UNI Research.

- Ytre Trondheimsfjorden har en terskel på ca 200 m ut mot kysten og midlere bassendyp er ca 164 m. Indre Trondheimsfjord og Beistadfjorden har en felles terskel mot ytre del av Trondheimsfjorden på ca 100 m (Tautraterskelen). Beistadfjorden har også en lokal indre terskel på ca 140 m mot indre Trondheimsfjord. Midlere bassendyp i indre Trondheimsfjord er ca 137 m og midlere bassendyp under den lokale terskelen (140m) i Beistadfjorden er ca 42 m. Datakilde: (1998-2001) NTNU – Institutt for biologi, Trondheim.

3 Resultater og diskusjon

3.1 Fjorder med terskeldyp $H_t \leq 50$ meter

Midlere oksygenforbruk dO_2/dt (ml/l/måned), korrigert for vertikal turbulent diffusjon ($K_z \cdot dO_2/dz$), i et fjordbasseng øker med økte tilførsler/omsetning av marint organisk materiale (F_c) ($gCm^{-2}m\ddot{a}ned^{-1}$) og avtar med midlere bassendyp (H_b):

$$(1) \quad dO_2/dt = (dO_2/dt_{obs} + K_z \cdot dO_2/dz) = m \cdot F_c \cdot H_b^{-1} \quad (ml/l \text{ måned}^{-1})$$

(Aure og Stigebrandt, 1990)

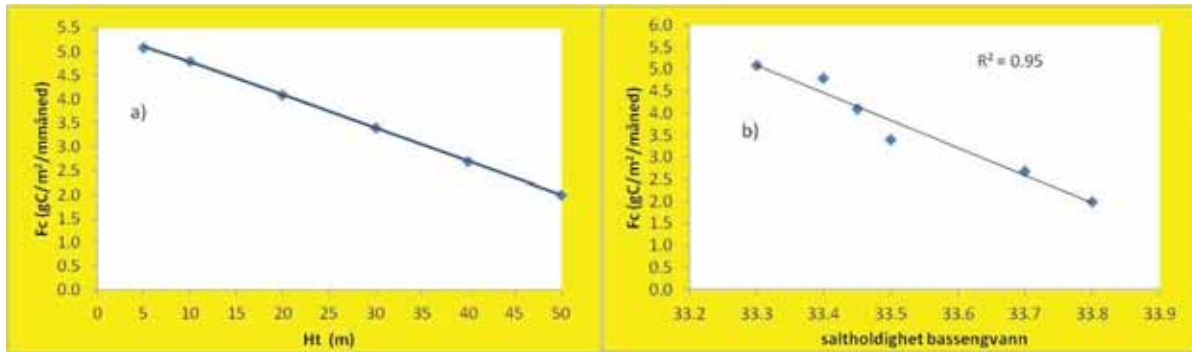
Den vertikale turbulente diffusjonskoeffesienten (K_z) er beregnet ut fra temperatur og eventuelle saltholdighetsendringer i stagnasjonsperioder i bassengene, $m = 2.43$ (ml O_2/g karbon) er en omregningsfaktor for oksidasjon av organisk marint materiale (Redfield). H_b (m) er midlere bassendyp = $Vol_b / Af_{terskel}$, hvor Vol_b er bassengvolum (m^3) og $Af_{terskel}$ er arealet i terskelnivå (m^2). Dermed kan F_c beregnes når vi kjenner midlere oksygenforbruk (dO_2/dt) og bassendyp (H_b):

$$(2) \quad F_c = dO_2/dt \cdot H_b \cdot m^{-1} \quad (gCm^{-2}m\ddot{a}ned^{-1})$$

Det er tidligere vist at tilførsler/omsetning av marint organisk materiale (F_c) i et gitt fjordbasseng avtar tilnærmet lineært med terskeldypet til fjorden (H_t) for terskeldyp grunnere enn ca 50 m (Aure og Stigebrandt, 1989).

$$(3) \quad F_c = (5.4 - 0.07 \cdot H_t) \quad (gCm^{-2}m\ddot{a}ned^{-1}) \quad H_t \leq 50m$$

Figur 4 a) viser at F_c - verdiene avtar tilnærmet lineært fra ca $5 gCm^{-2}m\ddot{a}ned^{-1}$ for basseng med terskeldyp ca 5m til ca $2 gCm^{-2}m\ddot{a}ned^{-1}$ for terskeldyp ca 50 m. Som vist i Figur 4 b) er det kystvann med saltholdigheter mindre enn ca 34.0 som dominerer i fjordbassengene. F_c - verdiene i denne type basseng representerer derfor i stor grad den lokale primærproduksjonen i fjord og kystområdene (Aure og Stigebrandt, 1989). Ligning (3) gjelder for fjorder nord for Skagerrak. Etter ca 1980 var det en økning i F_c på 50-70 % i fjordbasseng langs Skagerrakkysten med terskler mindre enn ca 50-60 m forårsaket av økt langtransportert av menneskeskapt organisk materiale (Aure, Danielssen og Sætre, 1996, Johannessen og Dahl, 1996).



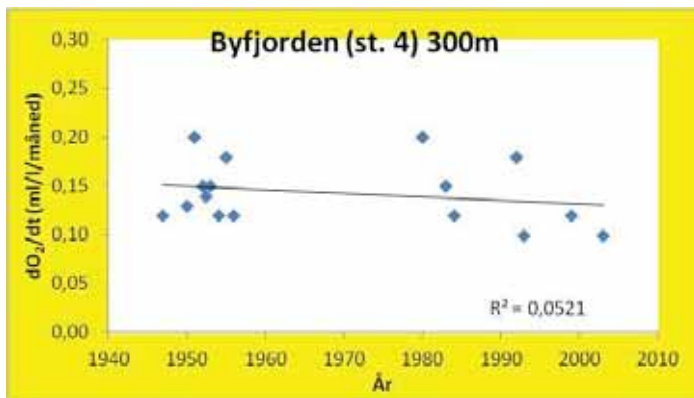
Figur 4a. Sammenheng mellom Fc og terskeldyp i fjordbasseng med terskeldyp $H_t < 50$ m b) Sammenheng mellom Fc og saltholdighet i bassengvann i fjordbasseng med terskeldyp $H_t < 50$ m.

3.2 Fjorder med terskeldyp $H_t \geq 60$ m

For å beregne Fc i fjordbasseng med terskeldyp dypere enn ca 60 m er midlere observert oksygenforbruk (dO_2/dt), korrigert for vertikal diffusjon. Tabell 2 viser at midlere oksygenforbruk i fjord/kystbassengene med terskeldyp dypere enn ca 60 m varierte mellom 0.055 og 0.30 ml/l O_2 måned⁻¹. I Ytre Oslofjord (Rauøybassenget), med terskeldyp på ca 120 m, hvor det er lange tidsserier av oksygen i dypvannet er det ikke observert endringer i oksygenforbruket siden 1950 - 60 tallet (Aure, Danielssen og Naustvoll, 2014). I Skagerrakbassenget med terskeldyp på ca 270 m var det tilnærmet konstant oksygenforbruk mellom 1955 og 1991 (Aure og Dahl, 1994).

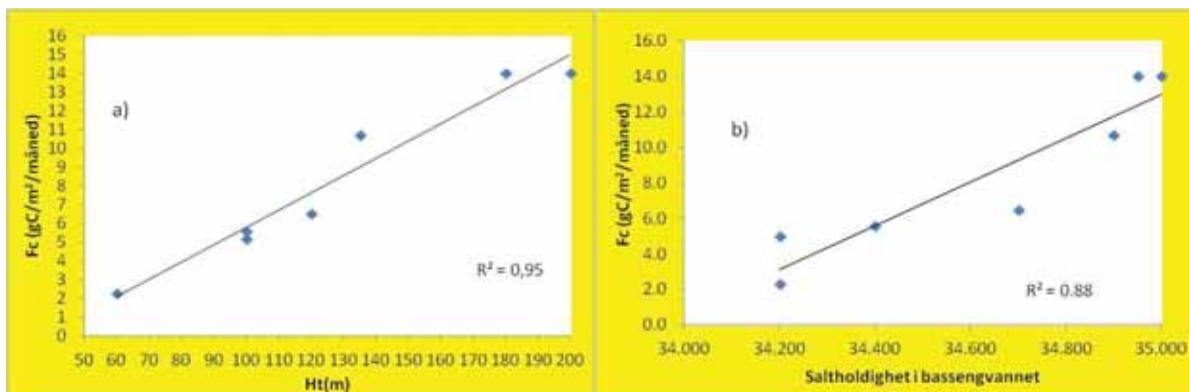
Tabell 2. Terskeldyp H_t (m), midlere oksygenforbruk dO_2/dt (ml/ O_2 måned⁻¹) og midlere beregnet tilførsel/omsetning av marint organisk materiale Fc (gCm^{-2} måned⁻¹) i fjord/kystbassengene angitt i tabellen.

Fjord	dO_2/dt (ml/ O_2 måned ⁻¹)	Fc (gCm^{-2} måned ⁻¹)	H_t (meter)
Skagerrakbassenget	0,055	15,5	270
Ytre Oslofjord	0,13	6,5	120
Ærøydypet (<1980)	0,18	2,3	60
Hardangerfjorden	0,13	14,0	180
Byfjorden(Bergen)	0,13	10,7	135
Ytre Trondheimsfjord	0,23	14,0	200
Indre Trondheimsfjord	0,10	5,6	100
Beistadfjorden	0,30	5,2	100



Figur 5. Oksygenforbruk dO_2/dt (ml/l måned⁻¹) i Byfjorden ved Bergen i perioden 1948-2003

I Byfjordbassenget ved Bergen, med terskeldyp på ca 130 m, viser observasjonene at det heller ikke i dette fjordbassenget har vært langtidsendringer i oksygenforbruket i perioden 1947 - 2003 ($R^2=0.05$) (Figur 5). Omsetningen av labilt organisk karbon i basseng med dype terskler > 100 m ser dermed ut til å ha vært tilnærmet konstant siden 1950-årene og i liten grad påvirket av økt menneskeskapt organisk belastning. Dette bla fordi oppholdstiden for vannmassene over terskeldyp i denne type fjorder som regel er mindre enn synketiden for lokalt produsert planteplankton fra overflatelaget til terskelnivå. F_C - verdiene beregnet fra oksygenforbruket i tabell 1 og ligning 2 økte tilnærmet lineært fra ca $2.3 \text{ gCm}^{-2}\text{måned}^{-1}$ i basseng med terskeldyp på ca 60 m og til ca $14 \text{ gCm}^{-2}\text{måned}^{-1}$ i basseng med terskeldyp ca 200 m (Figur 6a). I Skagerakbassenget med terskeldyp på ca 270 m var det tilnærmet samme F_C verdi som i fjordene med terskeldyp på ca 200 m ($14\text{-}15 \text{ gCm}^{-2}\text{måned}^{-1}$).



a)

b)

Figur 6. a) Sammenheng mellom F_C og terskeldyp (Ht) for fjordbasseng med terskeldyp mellom 60 og 200 m. b) Sammenheng mellom F_C og saltholdighet for fjordbasseng med terskeldyp mellom 60 og 200m.

Til forskjell fra fjorder med terskeldyp grunnere enn ca 50 m, hvor F_C ble redusert med økende terskeldyp (Ht) (Figur 4a), var det en økning av F_C med økende terskeldyp for terskeldyp dypere enn ca 60 m. Sammenhengen mellom F_C og terskeldyp (Ht) for terskeldyp større enn ca 60 m blir da:

$$(4) \quad F_C = (-3,45+0,09 \cdot Ht) \quad (\text{gCm}^{-2}\text{måned}^{-1}) \quad Ht \geq 60\text{m}$$

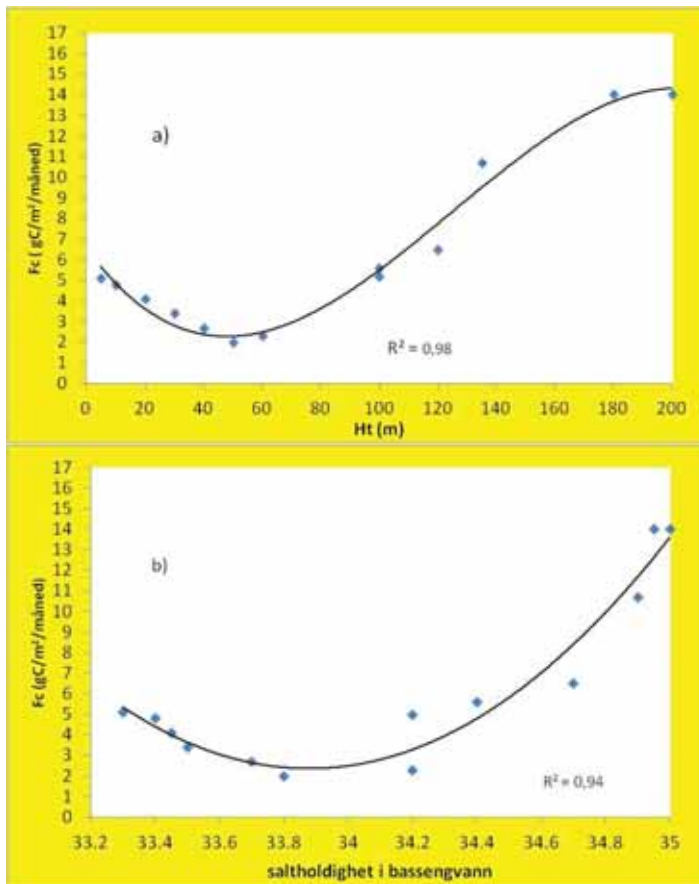
Figur 6b viser at F_c -verdiene økte tilnærmet lineært med økende saltholdighet i bassengvannet, fra ca $2 \text{ gC/m}^2/\text{måned}$ i ca 60m dyp til ca $14 \text{ gC/m}^2/\text{måned}$ for saltholdighet ca 35,0 (Atlantisk vann) i ca 200m dyp. Denne økningen skyldes økt innblanding av Atlantisk vann. Den økte tilførsel/omsetning av partikulært organisk materiale (F_c) i bassengene med økt innblanding av Atlantisk vann er trolig knyttet til den høyere primærproduksjonen i det Atlantiske vannet (Nord - Atlantiske drift, (Golfstrømmen)) som strømmer inn i Norskehavet /Nordsjøen og som lagrer seg inn på 100 - 200m dyp under den norske kyststrømmen. (Figur1 og 3). Som nevnt foran er det størst sannsynlighet for innstrømning til fjordbasseng med dype terskler i sommerhalvåret når primærproduksjonen i atlantisk vann er på sitt høyeste. Primærproduksjonen i den Nord - Atlantiske drift (Golfstrømmen) like sør for innløpet til Norskehavet og Nordsjøen er målt til ca $370 \text{ gCm}^{-2}\text{år}^{-1}$ (Martin et. al 1993). I den norske kyststrømmen og i fjordene er midlere primærproduksjon beregnet å være omlag $145 \text{ gCm}^{-2}\text{år}^{-1}$ (Andersen et. al, 2014). Dette viser at primærproduksjonen i innstrømmende atlantisk vann er omlag 2.6 ganger høyere enn i kystvannet. Eksporten av karbon i ca 35 m dyp (ny produksjon) i innstrømmende atlantisk vann er målt til ca $168 \text{ gC/m}^2/\text{år}$ (ca $14 \text{ gC/m}^2/\text{måned}$) (Martin et. al 1993). I den norske kyststrømmen og i fjordene er midlere ny produksjon beregnet til omlag $55 \text{ gC/m}^2/\text{år}$ (Andersen et al 2014), dvs. ca 1/3 av ny produksjon i det atlantiske vannet.

Den betydelig høyere primærproduksjonen i det innstrømmende atlantiske vannet som lagrer seg under kystvannet i 100-200 m dyp kan forklare den markert økte tilførsel/omsetning av partikulært organisk materiale (F_c) med økende terskeldyp og innhold av atlantisk vann (saltholdighet) i fjordbasseng med terskel dypere enn 60-100 m.

3.3 Fjorder med terskeldyp 5 - 200 m

Oppsummert viser Figur 7a at F_c - verdiene for fjordbasseng med terskeldyp (H_t) mellom 5m og 200 m avtar tilnærmet lineært fra øvre lag ned til ca 60 m dyp, for deretter å øke gradvis til ca 200 m dyp. F_c - verdiene ($5\text{-}2 \text{ gCm}^{-2}\text{måned}^{-1}$) i de øverste 50m, knyttet til den lokale primærproduksjonen i kystvann og fjorder er tildels betydelig mindre enn F_c - verdiene i fjorder med terskler dypere enn ca 100 m. I en fjord med terskeldyp på ca 200 m er for eksempel F_c - verdien ca 4 ganger større enn for en fjord med terskeldyp på ca 30m.

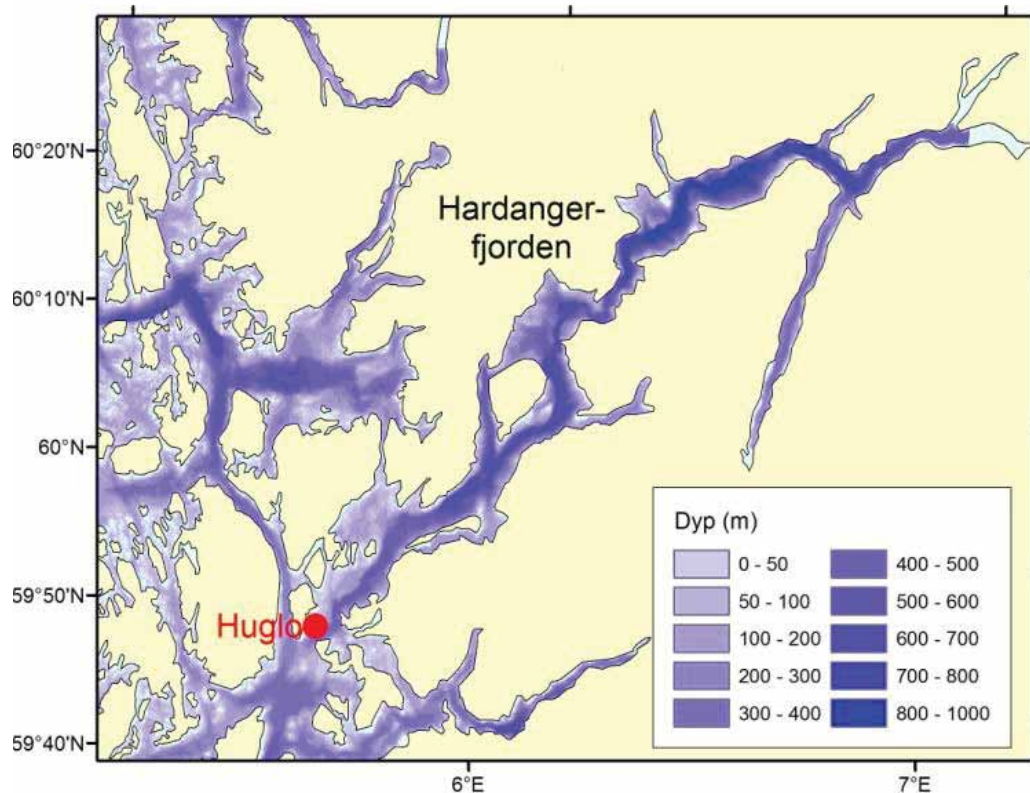
Dette viser at bidraget fra en gitt menneskeskapt organisk belastning (F_{cm}) til den naturlig tilførsel/omsetning av organisk materiale (F_c), (F_{cm}/F_c) avtar tildels betydelig for terskeldyp større enn 60 -100 m. Figur 7 b) viser at F_c er lavest for saltholdigheter i bassengvannet som representerer øvre deler av kystvannet ($S < \text{ca } 34$) og øker deretter gradvis med økende saltholdighet og dermed innhold av atlantisk vann ($S \geq 35$) . Ved å implementere F_c - verdiene i denne undersøkelsen i for eksempel FjordEnv er det nå mulig å gjøre beregninger for økt belastning av organisk materiale fra for eksempel fiskeoppdrett for fjorder med terskeldyp større enn 50-60 m.



Figur 7a. Sammenheng mellom tilførsler/omsetning av marint organisk materiale Fc og terskeldyp Ht for fjord/kystbasseng med terskeldyp mellom ca 5m og 200 m. b) sammenheng Fc og saltholdighet i fjord/kystbasseng med terskeldyp mellom ca 5m - og 200m.

Tiden mellom hver innstrømming til bassengvann i terskelfjorder (T_b) er blant annet bestemt av den vertikale turbulente blandingen som reduserer tettheten i bassengvannet i stagnasjonsperioder (Aure og Stigebrandt, 1989). Denne blandingen er sterkt koblet til tidevannsforskjellen som øker betydelig fra sør til nord, og vannutskiftningen i et gitt fjordbasseng vil derfor også øke nordover kysten. Økt vertikal turbulent blanding av oksygen bidrar også til at oksygenforbruket (dO_2/dt_{obs}) avtar. Dette medfører at oksygenminimum (O_{2min}) for et gitt fjordbasseng øker nordover kysten. Bæreevnen for økte tilførsler av organisk materiale fra for eksempel fiskeoppdrett, vil dermed også øke nordover kysten. For å få en større sikkerhet på beregningene av bæreevne for økte tilførsel av organisk materiale til fjordbasseng, bør det utføres målinger av oksygen, temperatur og saltholdighet i aktuelle fjordbasseng gjennom minst en årssyklus. I tillegg er det viktig med målinger av partikulært, oppløst og refraktært karbon.

4 Eksempel fiskeoppdrett Hardangerfjorden



Figur 8. Dybdeforhold i Hardangerfjordsystemet. Rød sirkel - terskel ved Huglo.

For å skalere det relative bidrag av organisk materiale fra fiskeoppdrett til et fjordbasseng har vi benyttet Hardangerfjorden med dyp terskel ($H_t = \text{ca } 180\text{m}$). Hardangerfjorden har en av de største tetthetene av fiskeoppdrettsanlegg i Norge. Det fleste av anleggene ligger i midtre og ytre deler av fjorden (kilde: Fiskeridirektoratet). Fjordbassenget i Hardangerfjorden strekker seg fra terskelen ved Huglo til den indre delen av Sørfjorden og Eidfjord (Figur 8). Totalarealet er ca 700 km^2 , mens arealet i terskeldyp er ca 450 km^2 . Volumet av fjordbassenget under terskeldyp (Vol_b) er ca 115 km^3 , mens totalvolumet (Vol_{tot}) er på ca 230 km^3 .

Organiske partikler fra fiskeoppdrettsanlegg består av spillfôr og fekalier. Det meste bunnfeller i anleggsområdet, mens fraksjonen som består av svevepartikler spres over et noe større område. Utviklingen innen oppdrettsnæringen de siste årene har ført til at de fleste større anlegg, som for eksempel i Hardangerfjorden, nå ligger på dypere vann. Dette medfører at de partikulære organiske utslippene i større grad sedimenterer i bassengvannet under terskeldyp.

Den naturlige tilførselen og omsetning av organisk materiale F_c til Hardangerfjordbassenget er beregnet til ca $14 \text{ g karbon/m}^2/\text{måned}$ (Tabell 2). Den totale tilførsel og omsetning av karbon i Hardangerfjordbassenget innenfor terskelen ved Huglo blir da omlag 75.000 tonn karbon per år.

Midlere oksygenforbruk (dO_2/dt) i et fjordbasseng er bestemt av tilførsler av tilførsler og omsetning av marint organisk materiale ($F_c \text{ gCm}^{-2}\text{måned}^{-1}$) og midlere bassengdyp (H_b).

$$(5) \quad dO_2/dt = m * F_c / H_b \quad (\text{ml/l/måned})$$

hvor $m=2.43 \text{ (mlO}_2\text{/gC)}$ er en omregningsfaktor for oksidasjon av organisk materiale (Redfield).

Med økte tilførsler av organisk materiale fra for eksempel fiskeoppdrett (F_{cm}), vil F_c og midlere oksygenforbruk (dO_2/dt) i lign (5) øke tilsvarende.

Oksygenminimum i bassengvannet (O_{2min}) bestemmes av oksygeninnholdet i bassengvannet like etter innstrømning av nytt vann (O_{2init}), oksygenforbruket (dO_2/dt) og tiden mellom hver vannutskiftning (T_b) (ligning 6). Tiden bassengvannet oppholder seg i fjorden er styrt både av tidevannsblanding i bassengvannet og tetthetsforholdene i kyststrømmen i terskelnivå. Det er vanligvis innstrømning av oksygenrikt vann til fjordbassengene med dype terskler ($> 100 \text{ m}$) i løpet av sommeren når vannmassene i terskelnivå har høyest tetthet (saltholdighet) (se Figur 2). Oksygenminimum i bassengvannet (O_{2min}) vil på bakgrunn av endringer i naturlige prosesser kunne variere noe fra år til år og over lengre tidsperioder.

$$(6) \quad O_{2min} = O_{2init} - dO_2/dt_{obs} * T_b \quad (\text{ml/l})$$

Hardangerfjorden har en av de største tetthetene av fiskeoppdrettsanlegg i Norge og i 2011/2012 var det en årlig produksjon på ca 70. 000 tonn fisk, hvor omlag 50. 000 tonn/år ble produsert over Hardangerfjordbassenget (kilde: Fiskeridirektoratet). En fiskeproduksjon på ca. 50.000 tonn per år, med 20 % forspill (maksimalt), tilfører fjordbassenget derfor maksimalt ca 5000 tonn karbon per år i form av feces og forspill (FjordEnv), dvs. omlag 6 % av den beregnede tilførsel/omsetning av karbon i fjordbassenget på ca 75.000 tonn karbon per år. Dette medfører at midlere oksygenforbruk øker med ca. 6 % (maksimalt), dvs. ca. 0,008 ml/l per måned (Tabell 2, ligning 5).

Ut fra observasjonene i Hardangerfjorden ser det ut til at en typisk stagnasjonstid for bassengvannet (T_b) fra sensommeren og utover høsten i fjordbassenget er ca 6 måneder og oksygen startverdi etter innstrømning (O_{2init}) er omlag 5,8 ml/l. Til sammenligning er typisk stagnasjonsperiode for bassenget i Byfjordsystemet med terskeldyp på ca 130 m, basert på jevnlig målinger i perioden 1956 - 2003, ca 7 måneder.

Med ca 6% økning i oksygenforbruket (maksimalt) vil oksygenminimum i fjordbassenget (ligning 6) reduseres fra ca 5 ml/l til ca. 4,95 ml/l, dvs. en reduksjon på ca 1,3%. Den beskjedne effekten på oksygenforholdene i Hardangerfjordbassenget med økte tilførsler av organisk materiale fra fiskeoppdrettet er et resultat både av det store bassengvolumet $Vol_b = 115 \text{ km}^3$ og den relativt høye naturlige tilførsel/omsetning av organisk materiale i fjordbasseng med dype terskler.

5 Referanser

- Aure J. and A. Stigebrandt, A. 1989. On the influence of topographic factors upon the oxygen consumption rate in sill basins of fjords. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (1989) 28, 59-69.
- Aure J. and Dahl E.1994. Oxygen, nutrients and water exchange in the Skagerrak Basin.1994. *Continental Shelf Research*. Vol.14. No.9.pp.965-977.1994
- Aure J., Danielssen D., and Sætre R.1996. Assessment of eutrofication in Skagerrak coastal waters using oxygen consumptions in fjordic basins. *ICES Journal of Marine Science*, 53: 589-595.
- Aure, Danielssen og Naustvoll, 2014. Miljøundersøkelser i norske fjorder: Ytre Oslofjord 1937-2011. *Fisken og Havet* nr.5/2014. Havforskningsinstituttet mai 2014.
- Andersen (Ed) 2014. Karbonfangst og matproduksjon i fjorder. Rapport fra Havforskningen, Nr.7- 2014. Havforskningsinstituttet mars 2014.
- Stigebrandt, A. 2001. Fjord Environment- A water quality model for fjords and inshore waters. Goteborg University, Earth Science Centre, Report C40. 41 pp. 2001
- Stigebrandt A., Aure J. and Molvær J.1996. Oxygen budget method to determine the vertical flux of particulate organic matter with application to the coastal waters off western Scandinavia. *Deep Sea Res. II*. Vol 43.
- Sætre, R. (Ed.) 2007. *The Norwegian Coastal Current - Oceanography and Climate*. Tapir Academic Press, Trondheim. 159 pp.
- Johannessen, T and Dahl, E.1996. Decline in oxygen concentrations along the Norwegian Skaggerrek coast, 1927-1993: A Signal of ecosystem changes due to eutrophication?. *Oceanogr*.41, pp. 766-778.
- Martin, J.H., Fitzwater S.E, Gordon, R.M., Hunter C.N. and Tanner S.J.1993. Iron, primary production and carbon-nitrogen studies during the JGOFS North Atlantic bloom experiment. *Deep Sea Research Part II: Topical studies in Oceanography*. Volume40, issue1-2, 1993, pages 115-134.

Retur: Havforskningsinstituttet, Postboks 1870 Nordnes, NO-5817 Bergen



HAVFORSKNINGSINSTITUTTET
Institute of Marine Research

Nordnesgaten 50 – Postboks 1870 Nordnes
NO-5817 Bergen
Tlf.: +47 55 23 85 00 – Faks: +47 55 23 85 31
E-post: post@imr.no

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET
AVDELING TROMSØ

Sykehusveien 23, Postboks 6404
NO-9294 Tromsø
Tlf.: +47 77 60 97 00 – Faks: +47 77 60 97 01

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET
FORSKNINGSSTASJONEN FLØDEVIGEN

Nye Flødevigveien 20
NO-4817 His
Tlf.: +47 37 05 90 00 – Faks: +47 37 05 90 01

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET
FORSKNINGSSTASJONEN AUSTEVOLL

NO-5392 Storebø
Tlf.: +47 55 23 85 00 – Faks: +47 56 18 22 22

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET
FORSKNINGSSTASJONEN MATRE

NO-5984 Matredal
Tlf.: +47 55 23 85 00 – Faks: +47 56 36 75 85

AVDELING FOR SAMFUNNSKONTAKT
OG KOMMUNIKASJON

Public Relations and Communication
Tlf.: +47 55 23 85 00 – Faks: +47 55 23 85 55
E-post: informasjonen@imr.no

www.imr.no

