ISSN 0071 - 5638

PROSJEKTRAPPORT

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET
INSTITUTE OF MARINE RESEARCH

Nordnesgaten 50, Postboks 1870 Nordnes, 5817 BERGEN
Tlf. 55 23 85 00, Fax 55 23 85 31, www.imr.no

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
Fax 77 60 97 01	Fax 37 05 90 01	Fax 56 18 22 22	Fax 56 36 75 85

Distribusjon:
Åpen

HI-prosjektnr.:
10061-1

Oppdragsgiver(e):
FID

Oppdragsgivers referanse:

Dato:
6. sept. 2004

Program:
Havbruk

Forskningsgruppe:
FG16
Fiskevelferd og oppdrettsmiljø

Antall sider totalt:
55

Rapport:
FISKEN OG HAVET

Nr. - År
14 - 2004

Tittel (norsk/engelsk):
Merd-miljø og fiskevelferd i lakseproduksjon på kyst- og fjordlokaliteter på Vestlandet
Cage environment and fish welfare

Forfatter(e):
David Johansson, Jon-Erik Juell, Frode Oppedal,
Jan Erik Stiansen og Jan Erik Fosseidengen

Sammendrag (norsk):
Denne undersøkelsen gir detaljerte øyeblikksbilder av en kompleks variasjon i fysiske, biologiske og kjemiske miljøfaktorer på typiske kyst- og fjordlokaliteter om høsten. Det var store variasjoner i de fleste miljøfaktorer innenfor ett og samme anlegg både over dyp og tid. Hovedstrømretning og og strømhastighet i et referansepunktet ved en lokalitet sier lite om det reelle strømbildet ved merdene. Demping og avbøyning av vannstrøm forårsaket av anlegget har store konsekvenser for oksygenmetningen i merdene. Variasjonen i svømmedyp og observert fisketetthet var stor. Resultatene illustrerer at lakseproduksjon i merder i sterk grad foregår på naturens premisser. Oppdrettsfisk må tilbys miljøforhold som sikrer god fiskevelferd gjennom valg av lokalitet og anleggsutforming.

Summary (English):
This survey give detailed information about the complex variation of the physical, biological and chemical variation in environment at typical fjord and coastal farming sites in the autumn. Large variations with depth and time were seen within the same farm. Water current direction and speed at a reference point outside a farm was not representative for the current seen close to the cages. Current reduction and deflection caused by the cages affected the oxygen levels within cages. Large variation in swimming depth and observed fish density was seen. Through site and technolgy choice, farmed fish must be offered an environment that secure fish welfare.

Emneord (norsk):	Subject heading (English):
1. laks	**1.** salmon
2. miljø	**2.** environment
3. fiskevelferd	**3.** fish welfare

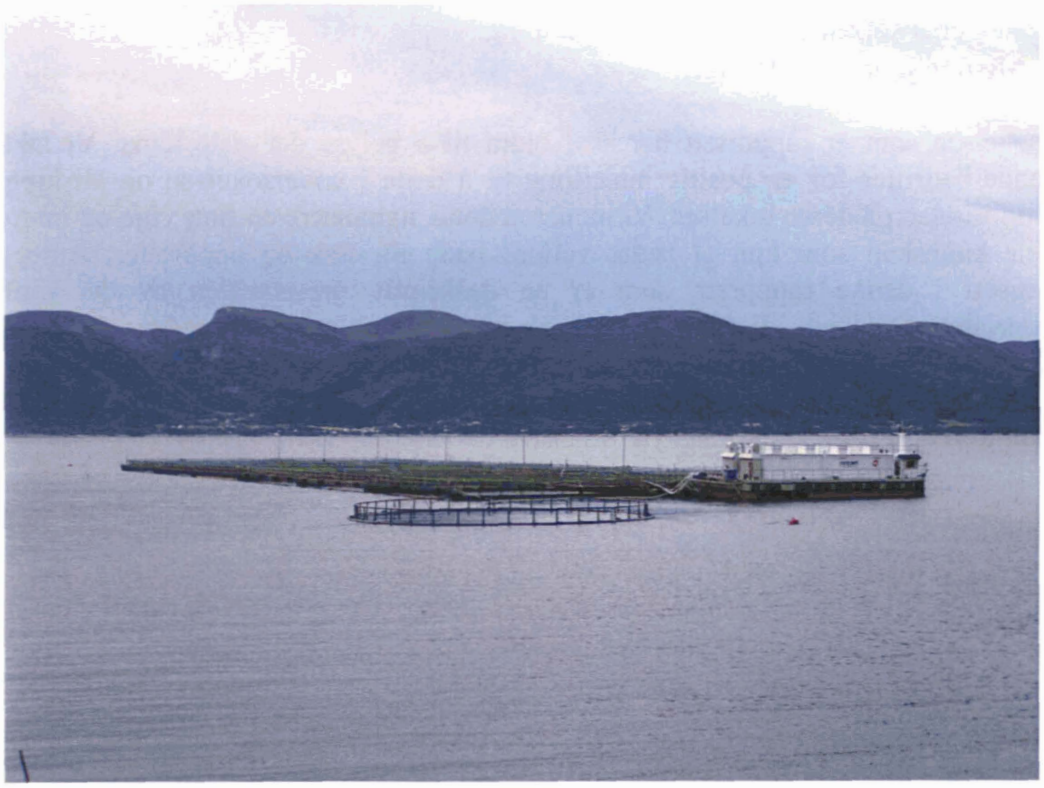
Jan-Erik Juell
prosjektleder

Jan-Erik Juell
forskningsgruppeleder

1 JUN 2006

LOKALISERING AV OPPDRETTSANLEGG

Merd-miljø og fiskevelferd i lakseproduksjon på kyst- og fjordlokaliteter på Vestlandet



David Johansson, Jon-Erik Juell, Frode Oppedal, Jan Erik Stiansen og Jan Erik Fosseidengen

Havforskningsinstituttet

Februar 2004

HAV - LIV - MILJØ

Forord

Fiskeridepartementet trenger råd om ulike strategier ved videreutvikling av havbruksnæringen sett innenfor en helhetlig forvaltningsplan for kystsonen. I Havforskningsinstituttets strategiplan for havbruksforskning (2002-2006) er "Lokalisering av oppdrettsanlegg" ett av fire satsningsområder. Satsingsområdet har som overordnet mål å avklare de naturvitenskapelige og etiske spørsmålene næring, forvaltning og offentlighet står overfor i forbindelse med plassering, størrelsesavgrensning, utforming og drift av marine oppdrettsanlegg. Havforskningsinstituttet fokuserer på 3 hovedtema:

- Overlevelse og betydning av sykdomsfremkallende mikroorganismer i marint miljø
- Regional kapasitet for organisk belastning
- Merdmiljø og fiskevelferd

Undersøkelsen som er rapportert her skal bidra til å belyse det siste tema. Vi takker alle deltagende bedrifter for en positiv innstilling til å delta i undersøkelsen og all hjelp under gjennomføringen på deres lokalitet. Vi mener at dette signalisere en flott vilje og interesse for å utvikle kunnskap som kan gi bedre velferd både for fisk og oppdretter. Anleggene er anonymisert i denne rapporten som er en deskriptiv presentasjon av det omfattende datamaterialet. Dataene vil bli videre analysert og publisert i populærvitenskaplige og vitenskaplige artikler og foredrag. Følgende team fra Havforskningsinstituttet sto for gjennomføring av prosjektet: Jan Erik Fosseidengen, David Johansson, Jon-Erik Juell, Frode Oppedal, Ronald Pedersen og Jan Erik Stiansen

Jon-Erik Juell
Prosjektleder

INNHOLD

	Side
1. Sammendrag	4.
2. Bakgrunn	5.
3. Materiale og metoder	8.
4. Resultater	11.
4.1. Lokalitet 1- "Fjord"	11.
4.1.1. Saltholdighet og temperatur	11.
4.1.2. Svømmedyp og fisketetthet	11.
4.1.3. Ammoniakk og karbondioksid	12.
4.1.4. Vannstrøm, oksygenfluks og oksygenmetning	12.
4.2. Lokalitet 2 - "Kyst"	19.
4.2.1. Temperatur og saltholdighet	19.
4.2.2. Svømmedyp og fisketetthet	19.
4.2.3. Ammoniakk og karbondioksid	20
4.2.4. Vannstrøm, oksygenfluks og oksygenmetning	20
4.3. Lokalitet 3 - "Kyst"	26.
4.3.1. Temperatur og saltholdighet	26.
4.3.2. Svømmedyp og fisketetthet	26.
4.3.3. Ammoniakk og karbondioksid	27.
4.3.4. Vannstrøm, oksygenfluks og oksygenmetning	27.
4.4. Lokalitet 4 - "Fjord"	33.
4.4.1. Temperatur og saltholdighet	33.
4.4.2. Svømmedyp og fisketetthet	33.
4.4.3. Ammoniakk og karbondioksid	34
4.4.4. Vannstrøm, oksygenfluks og oksygenmetning	34.
5. Diskusjon	40.
6. Referanser	47.
7. Appendiks strømmålinger	49.

1. Sammendrag

Ved lokalisering av merdanlegg for laks bør en legge vekt på at fisken tilbys miljøforhold som sikrer god fiskevelferd gjennom hele produksjonsfasen. Målet med denne undersøkelsen var å gi detaljerte øyeblikksbilder av variasjonen i fysiske, biologiske og kjemiske miljøfaktorer på typiske kyst- og fjordlokaliteter. Undersøkelsen fokuserte på siste del av produksjonssyklusen. Biomassen var relativt høy, men lå godt under (8.1-15.9 kg /m^3) det som er tillatt ifølge den såkalte "Tetthetsregelen" som sier at biomassen ikke skal overstige 25 kg /m^3 reelt oppdrettsvolum. Oksygenmetningen og faktorer som antas å påvirke denne, særlig vannstrøm og fordeling av fisk, ble gitt spesielt fokus. Bildene som avtegner seg er komplekse og noen av observasjonene er vanskelig å forklare. Det som imidlertid kan slås fast er at det innenfor en 50 timers periode er observert:

- Store variasjoner i de fleste miljøfaktorer innenfor ett og samme anlegg både over dyp og tid.
- Hovedstrømretning og strømhastighet i referansepunktet på en lokalitet sier lite om det reelle strømbildet i merdene.
- Demping og avbøyning av strøm forårsaket av anlegget har store konsekvenser for oksygenmetningen i merdene.
- Det var stor variasjon i svømmedyp og observert fisketetthet.
- Ammoniakk og karbondioksid verdier var generelt lave og langt under grenseverdier.
- Større variasjon i miljøparametere på fjord- enn på kystlokaliteter forårsaket av vertikale gradienter i saltholdighet og større effekt av tidevann på oksygenfluks.

Tatt i betraktning at undersøkelsen ble gjennomført i løpet av kun 14 dager og innenfor en begrenset geografisk utstrekning illustrerer resultatene i hvor sterk grad lakseproduksjon i merder foregår på naturens premisser. En må derfor forvente at man kan ha stor variasjon i produksjonspotensial mellom ulike lokaliteter på samme tid og innefor en lokalitet over tid. Valg av lokalitet er derfor av stor betydning for merdmiljøet og dermed atferd og velferd, som igjen har konsekvenser for produksjonsparametere som vekst og forfaktor.

2. Bakgrunn

I følge en omfattende produktivitetsundersøkelse (POL-prosjektet) av norsk matfiskproduksjon som inkluderte 11.5 % av smoltutsettet i 1998 (13.6 millioner smolt) var det 10-16% dødelighet i ulike regioner i Norge og helt opp i 30 % i et område som var rammet av IPN (Anon. 2000). Årsaken til variasjon i dødelighet mellom anleggene kunne delvis forklares av en svak korrelasjon med miljøfaktorer som lokalitetens dybde og antall smolt, samt fôringsrutiner. Det er også veldokumentert at dårlige miljøforhold er en medvirkende årsak til sykdomsutbrudd. Den relativt lave forklaringsprosenten (22%) i produktivitetsundersøkelsen kan skyldes at viktige miljøfaktorer ikke ble registrert. Merdmiljøet er komplekst og varierer både i tid og rom. Kunnskapen vi har om de ulike miljøfaktorene i merd er i beste fall fragmentert og ofte helt fraværende og det stilles i dag heller ingen konkrete formelle krav til miljøet i en merd. Fiskeridepartementet arbeider for tiden med nye produksjonsregulerende tiltak. I denne forbindelse har Fiskeri og Havbruksnæringens Landsforening også utarbeidet en rapport hvor alternativene maksimalt tillatt areal (MTA), maksimalt tillatt biomasse (MTB) og maksimalt tillatt forenergi (MTF) har blitt vurdert opp mot hverandre fra flere perspektiver (KPMG 2003). I disse vurderinger er krav til vannkvalitet i oppdrettsmerder kun overflatisk vurdert.

Forbrukeren har en legitim rett til dokumentasjon om under hvilke forhold maten de spiser produseres. Er det for eksempel for høye tettheter i merdene som fører til et uakseptabelt miljø? Bidrar et dårlig oppdrettsmiljø til redusert immunforsvar og utbrudd av sykdom? Lider fisken på grunn av unødig finneslitasje og parasittangrep? Det er et tankekors at vi fremdeles ikke har empirisk kunnskap som kan underbygge gode svar på denne type spørsmål og det er lite tilfredstillende at produksjonen av den overveiende delen av biomassen i norsk akvakultur foregår i et miljø vi har så fragmentert kunnskap om. Etablering av slik kunnskap kan danne basis for anbefalinger om rimelige miljøkrav, utvikling av ny "velferdsteknologi" og bedre driftsrutiner, samt være nyttig innenfor produksjonsutvikling av nye oppdrettsarter. I 2003 ble Stortingsmeldingen om "Dyrehold og dyrevelferd" behandlet i stortinget. Denne slår fast at Norge har et spesielt ansvar for å sikre god dyrevelferd i akvatisk produksjon basert på en etisk grunnholdning og kompetanse hos produsentene (Anon. 2003). Som en direkte følge har det nye Mattilsynet nå startet arbeidet med nye forskrifter for hold, transport og slakting av oppdrettsfisk. En del av mandatet i dette arbeidet er å tilpasse slike forskrifter til det pågående arbeidet på dette området i EU.

På en makroskala setter lokalisering av et merdanlegg rammer (breddegrad, eksponeringsgrad og topografi) for det miljøet som tilbys laksen. Den merdteknologi som velges avgrenser ytterligere et lite vannvolum hvor en rekke miljøfaktorer (vannstrøm, oksygen, temperatur, saltholdighet, lys m.v.) varier naturlig både med døgn, sesong og dyp, uten at oppdretteren kan påvirke dette i særlig grad. Samtidig påvirker oppdretteren miljøet gjennom valg av fisketetthet, fôringsregime, kunstige lysregimer og hvor ofte han skifter begrodde nøter, plukker dødfisk m.v. Det er behov for å utvikle modeller som kan beskrive dynamikken i dette kompliserte miljøet, som kan prediktere risikoperioder og bidra til å utvikle lokalitets spesifikke begrensninger i produksjonen. En kan for eksempel anta at merdmiljøet på en eksponert havlokalitet er mer stabilt og dermed tåler en høyere produksjon enn en fjordlokalitet. Ethvert modelleringsarbeid bør imidlertid basere seg på gode empiriske data som grunnlag for å utvikle modellen rundt sentrale mekanismer i systemet. Slike data eksisterer ikke for merdmiljø. Det er derfor et klart behov for å samle inn slike data med den nødvendige oppløsningen i tid og rom.

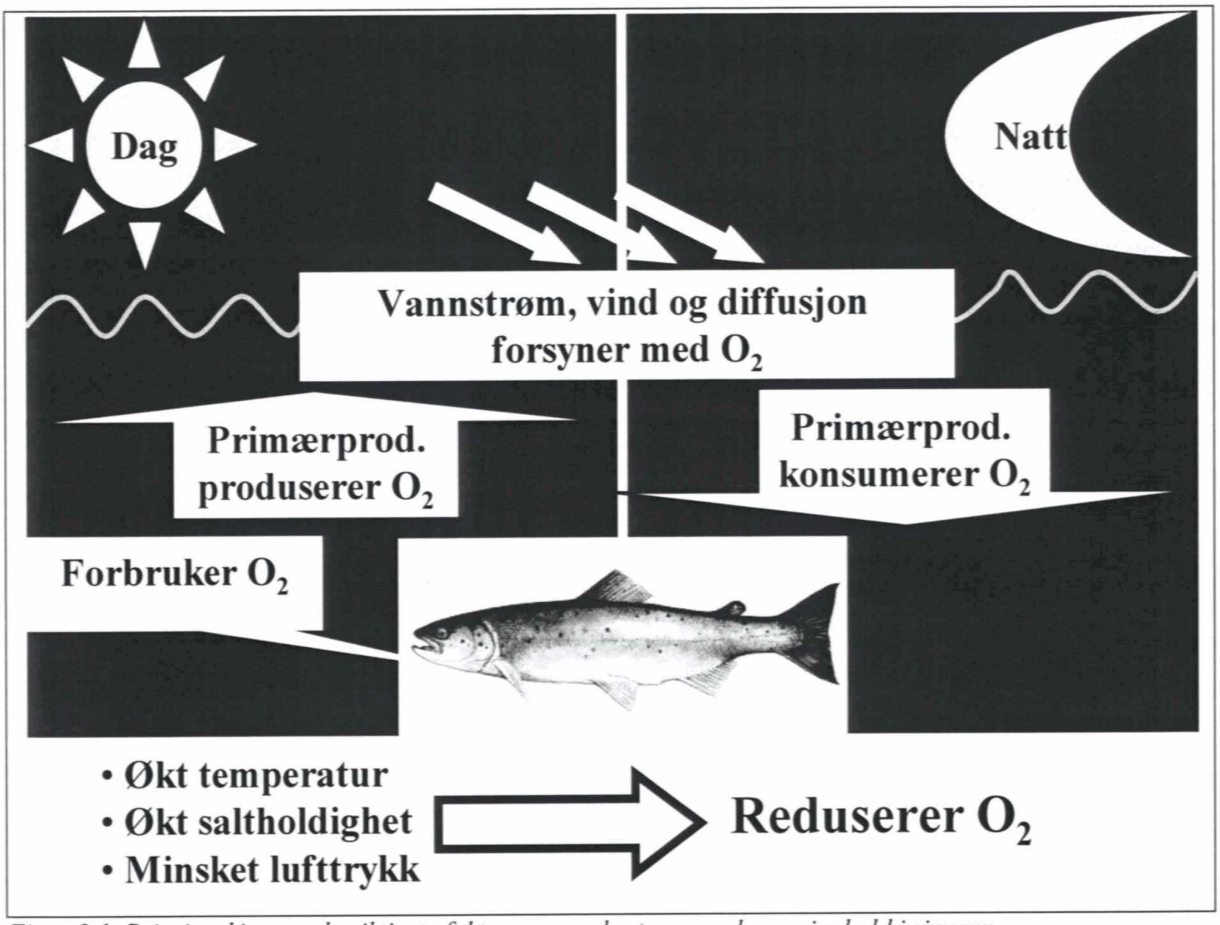
Ethvert dyr er genetisk og fysiologisk tilpasset et spesielt livsmiljø som består av et flerdimensjonalt rom av fysiske, kjemiske, biologiske, sosiale, og ernæringsmessige dimensjoner. Innenfor hver dimensjon, for eksempel temperatur eller oksygenkonsentrasjon, er det et preferanseområde hvor dyret er best tilpasset, mens det finnes et større toleranseområde hvor dyret kan overleve i kortere eller lengre tid. Når dyret fjerner seg fra preferanseområdet vil den biokjemiske likevekten (homeostasen) i dyret endres, og det må gjøre tiltak for å rette den opp. Dette kan gjøres via indre biokjemiske prosesser, som ofte også fører til endring i atferd. Begge deler vil være ressurskrevende. Dersom dyret ikke kan komme tilbake til preferanseområdet, vil dette påføre dyret økte kostnader som etter hvert vil gi den problemer med å opprettholde de normale livs-prosessene og føre til at utvikling, helse og liv trues. God velferd kan derfor defineres som en livssituasjon hvor dyret kan opprettholde normale livs-prosesser og utvikling. Kortere opphold i et ugunstig miljø kan tolereres dersom kostnadene ikke gir varige skader. I en oppdrettssituasjon, hvor vi tar dyret ut av sitt naturlige miljø, samtidig som vi ikke gir den mulighet til å velge sitt preferansemiljø, er det store muligheter for at dyrets helse og velferd blir truet, og at en ikke får utnyttet dets produksjonspotensial.

Det er rapportert få omfattende miljøundersøkelser fra kommersiell lakseproduksjon og enda færre som indikerer hvordan fisken responder på ulikt miljø. Et viktig utgangspunkt i denne undersøkelsen er at det sannsynligvis kun er enkelte perioder i løpet av en produksjonssyklus at miljøet er en trussel for fiskens velferd og helse. Når en skal vurdere risiko på ulike lokaliteter bør slike perioder tillegges vekt fordi de kan gjøre store skader på en ellers problemfri produksjon. I denne undersøkelsen fokuseres det på oksygen i perioder med relativt høy biomasse i anlegget og relativt høy sjøtemperatur.

Oksygentilførsel til fisken avhenger av vannstrømmen. Oksygen i sjøvann produseres av alger eller ved innblanding av luft i overflaten. Løseligheten av oksygen i vann er avhengig av temperatur, saltholdighet og lufttrykk. Ved økt temperatur eller saltholdighet reduseres løseligheten av oksygen målt som milligram per liter. Ved økt luftrykk øker løseligheten. Disse fysikalske faktorene er dermed med på å påvirke hvilken mengde oksygen som er løst i vann på en gitt lokalitet til en gitt tid. Årstidsvariasjoner i primærproduksjon og fysikalske faktorer kan gi store variasjoner i mengden oksygen som er løst i sjøvann. I perioder med høy primærproduksjon er det store variasjoner i oksygenmetning mellom dag og natt og det har vært observert massedød i laksemerder i slike perioder. For eksempel ble det i løpet av en 4 ukers periode med høy algeproduksjon ble det observert en appetitt reduksjon på 20-80%. En del av fisken døde, hovedsakelig på grunn av relativt lave oksygenverdier om natten kombinert med klogging av gjellene (Treasurer 2003).

Det som er viktigst for fisken er imidlertid ikke bare mengden som er løst, men hvor mettet vannet er. Metningsgraden (% oksygen) står i forhold til deltrykket av oksygen i vannet og det er dette som er avgjørende for om fisken kan gjøre seg nytte av oksygenet som er løst i vannet. Oksygenmetning måles altså fordi det er direkte relevant for fiskens velferd. Hvis vi tenker oss at på et gitt tidspunkt har vi en metningsgrad av oksygen på en lokalitet vil fisken forbruke oksygen i energiproduksjon som den trenger i forbindelse med aktivitet og fordøyelse av fôr. Dersom oksygennivået blir for lavt vil dette kunne føre til problemer for fisken som den i første omgang kan kompensere ved å øke pustefrekvensen eller å oppsøke vann med høyere oksygenmetning. Hvis den ikke kan kompensere på denne måten vil den måtte redusere fôropptaket noe som igjen har konsekvenser for veksten. Dette er observert i eksperimentelle forsøk. I kommersielt fiskeoppdrett, hvor en har høye fisketettheter og målet

er at fisken skal spise mest mulig for å vokse raskt, kan oksygen lett bli en begrensende faktor hvis ikke tilgangen på nytt vann dekker behovet av oksygen.

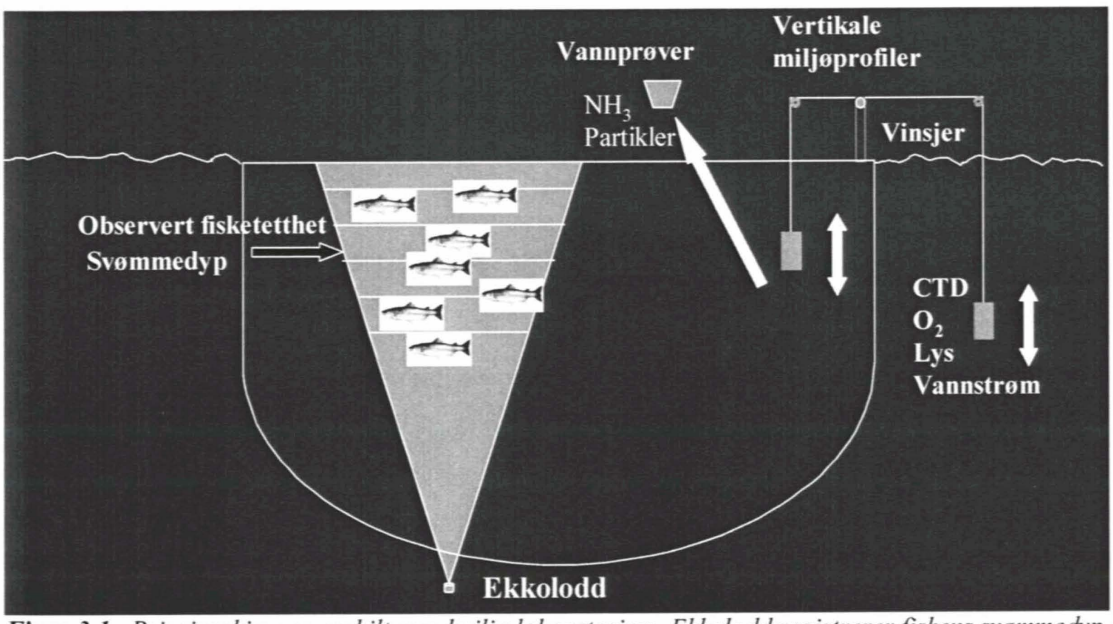


Figur 2.1. Prinsippskisse av de viktigste faktorene som bestemmer oksygeninnhold i sjøvann

Målet med denne undersøkelsen var å gi detaljerte øyeblikksbilder av variasjonen i fysiske og biologiske og kjemiske miljøfaktorer på typiske kyst- og fjordlokaliteter. Oksygenmetningen og faktorer som antas å påvirke denne, særlig vannstrøm og fordeling av fisk, ble gitt spesielt fokus. Undersøkelsen fokuserte på siste del av produksjonssyklusen, når biomassen i anleggene var relativt høy.

3. Materiale og metoder

To "kystlokaliteter" og to "fjordlokaliteter" på Vestlandet ble undersøkt. Alle lokalitetene hadde stålanlegg med parallelle merder og relativt høy biomasse i merdene. I perioden 1 - 13 september ble hvert av anleggene undersøkt over en 50 timers periode, som utgjorde 4 halvdaglige tidevannsykluser (fra flo til flo). To merder (forsøksmerder), på hver sin side, midt i anlegget ble valgt for måling av miljøparametere og fiskeatferd. Forsøksmerdene ble valgt på grunnlag av at de hadde det antatt dårligste miljø. De hadde høy biomasse og andre merder rundt seg hvilket potensielt kunne gi dårligst vannkvalitet i anlegget. Ved å velge to merder kunne vi også studere eventuelle negative effekter mellom merder i hovedstrømretningen. Målinger av miljøparametere og fiskens vertikale fordeling ble foretatt fra 0-20 m dyp i de to forsøksmerdene. I tillegg ble det tatt vannprøver for å måle konsentrasjonen av karbondioksid (CO_2) og ammoniakk (NH_3) (Figur 3.1). Basert på lokal kunnskap om hovedstrømretning på lokaliteten ble det også valgt ut et referansepunkt som man antok var upåvirket av anlegget. Her ble det målt lysintensitet i tillegg til de samme miljøparametere som i forsøksmerdene. I referansepunktet og på hver side av anlegget ved forsøksmerdene, ble det målt vertikale profiler av vannstrømmens hastighet og retning. Ved sammenligning mellom strømmålerne kunne vi dermed beskrive dempingseffekter av anlegget.



Figur 3.1. *Prinsippskisse av mobilt merdmiljø laboratorium. Ekkolodd registrerer fiskens svømmedyp og tetthet. Vinsjen hever og senker CTD'er som gir vertikale profiler av saltholdighet, temperatur, dyp, lys og oksygen. Vannstrømmen registreres med akustiske målere hengende i overflaten.*

Temperatur, saltholdighet, lys og oksygen

Vertikale profiler av miljøfaktorene temperatur, saltholdighet, lys og oksygen ble målt med CTD-sonder (YSI 6600) tilkoblet lys- og oksygensensorer. En gang per time ble sondene senket ned og heist opp ved hjelp av automatiske vinsjer (Belitronics 5000, Sverige). To parallelle sonder ble brukt i hvert målepunkt for å kvalitetssikre dataene og gjennomsnittet ble brukt i dataanalysene. Miljøprofilene ble registrert samtidig i forsøksmerdene og referansepunktet. Den hyppige prøvetakingen sikret en høy oppløsning på dataene i tid og rom. Oksygen ble målt både som mg O_2 l^{-1} og som % løst oksygen. Den første enheten viser hvor mye oksygen som er oppløst i vannet og den andre hvor mye som er tilgjengelig for

fisken. Metningsgraden (%) er ett uttrykk for den del av det totale gasstrykket i vann som utgjøres av oksygen. Dette del-trykket avgjør hvor lett fisken kan oppta oksygen over gjellene. At vi også måler mg O_2 l^{-1} kommer av at fiskens oksygenforbruk måles som mg O_2 per kg og vi kan dermed beregne om det er tilstrekkelig mye oksygen i vannet til å dekke fiskens forbruk.

Ammoniakk og karbondioksid
Vannprøver ble tatt i midten av i de to forsøksmerdene om natten med en standard vannhenter. Prøvene ble hentet fra fem dyp (0.5, 2, 5, 10 og 15 m). Dette ble gjentatt med 3 timers mellomrom, opptil 4 ganger. Analyser for ammoniakk og karbondioksid ble utført av NIVA.

Fisketetthet
Kalkulert fisketetthet blir ofte oppgitt som biomasse/volum og er beregnet fra en antatt jevn fordeling av fisken i merdvolumet. I virkeligheten er fisken sjelden jevnt fordelt i merdvolumet. Observert fisketetthet (OFD) ble registrert med ekkolodd. Systemet (kalt Merdøye) besto av svingere hengt opp under hver enkelt merd og tilknyttet en PC-basert ekkointegrator (Bjordal mfl. 1993). Ved å sammenstille den relative fiskefordelingen fra ekkoloddet med den totale biomassen i merden får vi ut fisketetthet som kg/m^3 i meters intervaller for hver av de to forsøksmerdene. I anlegg hvor merddypet er større enn 20 m har vi korrigert ved å fjerne en tilsvarende prosentvis biomasse i forhold til manglende dyp ut i fra en antakelse om jevn fordeling av biomassen. Data ble samlet inn kontinuerlig og lagret hvert minutt. Det ble beregnet et gjennomsnitt for hver time.

Strømmålinger
Strømmålinger ble foretatt med profilerende akustiske strømmålere plassert i overflaten, en Continental måler (NORTEK) i referansepunktet og to Aquadopp målere (NORTEK) på hver side av anlegget. Instrumentene gir vannets hastighet i nordlig-, østlig- og i vertikalretning. Målerne utnytter Doppler effekten i den reflekterte lyden til å beregne hastigheter i både horisontal- og vertikalplanet for flere lag nedover i sjøen. Continental-måleren har en oppløsning på opptil 2 m ned til 100-200 m dyp, mens Aquadopp-måleren har en oppløsning på 1 m ned til 25-50 m dyp. Maksimal rekkevidde på målerne er avhengig av gode refleksjonsforhold nedover i sjøen. På samtlige anlegg var det redusert maksimal rekkevidde på grunn av lite partikler dypt i vannsøylen. Data med lav kvalitet er fjernet før videre analyse (ingen data grunnere enn 20 m var av lav kvalitet). Alle målerne registrerte kontinuerlig og lagret middelverdier over 10 minutters intervaller. Vannstrøm grunnere enn 3-4 m for Continental måleren og 1-2 m for Aquadopp måleren kunne ikke måles på grunn av en dødsone nær måleren. Hensikten med plasseringen av strømmålerne var å kunne beskrive bakgrunnsstrømfeltet på lokaliteten (måler i referansepunktet), samt den strømmen som faktisk går inn i anlegget (målerne utenfor forsøksmerdene).

Dataanalyse
For å gi et oversiktsbilde over variasjonen i miljø og atferd blir temperatur, saltholdighet, lys, fisketetthet, vannstrømhastighet og –retning og oksygen presentert i sin helhet i figurer basert på middelverdier hver time på hvert dyp. Middelverdi, standardavvik, minimum og maksimum verdier ble beregnet. En vertikalprofil av lysintensiteten for hver lokalitet (kl 11-15) ble beregnet og presentert i en felles figur.

For strømdataene ble det beregnet en middelverdi per time. Data fra Continental-måleren ble interpolert fra 2 til 1 m oppløsning vertikalt, slik at alle data hadde en oppløsning på 1 m dyp

og 1 time. Hovedstrømretning ble beregnet fra Continental-måleren i 0-20 m over hele forsøksperioden og alle horisontale hastigheter rotert til en parallell- og en tverrkomponent i forhold til denne hovedstrømretningen. Lokalitet 1, 2 og 4 ligger på tvers, mens lokalitet 3 tilnærmet ligger parallelt med hovedstrømretningen. Definisjonen på målepunktene "innsiden" og "utsiden" henger sammen med hovedretningen til referansestrømmen ved at "innsiden" ligger på losiden og "utsiden" ligger på lesiden i forhold til hovedstrømmen på lokaliteten. For lokalitet 3 er "innsiden" den siden som vender mot hovedstrømmen, mens "utsiden" ligger litt på lesiden. Retningen er gitt i grader relativt til nord og rotasjonsretning med klokka. Data dypere en 20 m fra referansemåleren er presentert i Appendiks 1. Strømdataene fra målerne på "innsiden" og "utsiden" ble også rotert i hovedstrømretningen for referansepunktet før utregning av oksygenfluksen slik at sammenligningen skulle være mest mulig reell.

Et anlegg er en gjenstand i sjøen som både virker som en "fast" gjenstand som strømmen vil gå rundt og som en "svamp" som strømmen vil forsøke å gå igjennom. Begge deler kan endre strømbildet nær anlegget. Demping av strømmen forårsaket av anlegget ble grovt estimert ved å beregne prosentvise reduksjon i middelstrøm på innsiden og utsiden i forhold til referansepunktet:

$$D = (1 - VH / VH_{ref}) \cdot 100$$

der D er % demping, VH er total horisontal vannstrøm (på innsiden eller utsiden) og VH_{ref} er den totale horisontale vannstrømmen i referansepunktet.

Ved hjelp av oksygenkonsentrasjonen i vannet (referansepunktet) og strømhastigheten i alle dyp ble det gjort et estimat på hvor mye oksygen som blir tilført en merd (oksygenfluks). Oksygenfluks ble beregnet ved å multiplisere hastigheten i hovedstrømretning med oksygenkonsentrasjon over arealet av hver meter merdvegg etter følgende formel:

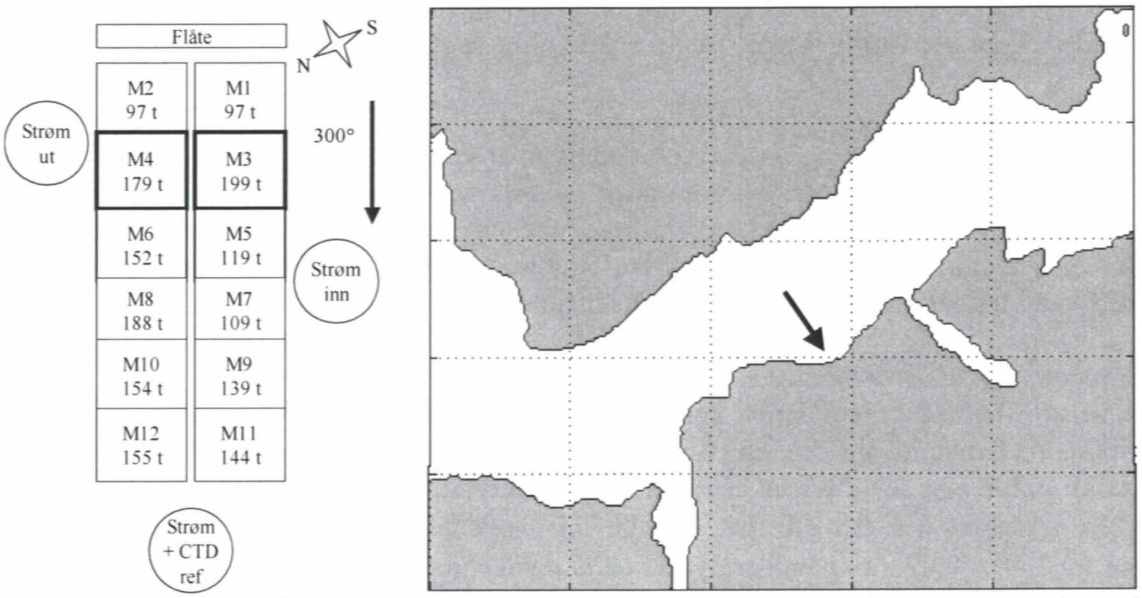
$$Fluks_{O_2} = 3.6 \cdot V \cdot B \cdot H \cdot K_{O_2}$$

der $Fluks_{O_2}$ er oksygenfluksen (kg O_2 / time) i hovedstrømretning, V er strømhastighet (m/s) i hovedstrømretning, B og H er henholdsvis bredden (m) og høyden (m) på merdvegg og K_{O_2} er oksygenkonsentrasjonen (mg/l). Konstanten 3,6 er brukt for å regne om enheten til kg O_2 / time. Summen av fluksen over 20 m merd-dyp er totalfluks, det vil si total mengde oksygen tilført en merd på en time. Oksygenfluksen ble beregnet både med strømdata fra referansemåleren og fra begge målerne plassert ved anlegget. Oksygenfluks i referansepunktet sier noe om potensielt tilgjengelig oksygen, mens målingene ved merdene sier noe om hvor mye oksygen som sannsynligvis er tilgjengelig for fisken i merden.

4. Resultater

4.1. Lokalitet 1 – "Fjord"

Lokaliteten er definert som en fjordlokalitet med flere store elver, stort nedbørsfelt rundt og dermed høy tilførsel av ferskvann.



Figur 4.1.1. Lokalitet 1 "Fjord". Skisse av anleggets utforming, biomasse og plassering av forsøksmerder (M3 og M4), referansepunkt og strømmålere. Pilen på kartutsnittet viser anleggets plassering.

Anlegget ligger på sørsiden av fjorden og er et stålanlegg med tolv 25 x 25 m merder som var 20 m dype (til bunnlinen) og et volum på 12500 m^3, og maskevidde på 24 omfar. Dypet under merdene var ca 100 til 500 m. Den totale biomassen på lokaliteten var ca 1732 tonn med en gjennomsnittlig fiskestørrelse per merd på 2,6 til 4,8 kg. Utfôring pågikk mellom kl 0650-1715 mer eller mindre kontinuerlig med sentralfôringsanlegg og visuell appetittregulering fra overflate. Gjennomsnittlig fôrmengde var ca 1 % per dag. Forsøksmerder var M3 og M4 og hadde en kalkulert fisketetthet på henholdsvis 12,3 og 15,9 kg m^{-3}. CTD'er ble benyttet i disse merdene og i referansepunkt ca 30 m utenfor anlegget, mot NV (se Figur 4.1.1).

4.1.1. Temperatur og saltholdighet

Data på saltholdighet og temperatur viste at dette var en typisk fjordlokalitet med et ferskere og varmere vannlag ned til ca 5 m, et kraftig sprangsjikt fra 5-11 m med kaldere og saltere vann dypere i merden. Saltholdigheten varierte fra 12,3 til 33,9 med et gjennomsnitt på 28,7 ± 5.5, med lave verdier i overflaten og økende med dybde. Temperaturen varierte fra 7.7 °C til 15,7 °C med en middeltemperatur på 11.1 ± 2.9 °C, med høye verdier i overflaten og synkende med dybde. Det var bare små endringer i temperatur og saltholdighet i løpet av observasjonsperioden (se Figur 4.1.2).

4.1.2. Svømmedyp og fisketetthet

På grunn av tekniske problemer mangler det et døgn med data fra ekkoloddet (se Figur 4.1.3). Det generelle bildet var at fisken ikke var jevnt fordelt i merdene og hadde varierende observert tetthet med tid og dyp. Forskjellen mellom merdene var små med litt mer fisk dypt nede i merd 4 enn i merd 3. Mest markerte forskjeller i svømmedyp og observert fisketetthet var det mellom dag og natt. Om dagen sto fisken samlet i øvre halvdel av merden med høy

fisketetthet (30 - 45 kg m^{-3}, maks. 78 kg m^{-3}) og det ble nesten ikke observert fisk under 10 m dyp (min. 0 kg m^{-3}), med unntak av litt fisk som sto i bunnen av merden. Om natten spredde fisken seg ut i større deler av merden med observerte fisketettheter på hovedsakelig under 30 kg m^{-3}. På nattetid var det altså en god del fisk også i det dypere og kaldere vannet. Tidspunktet for endring i atferd fra dag til natt stemmer overens med tiden for daggry (lysintensitet, Figur 4.1.2c) og fra dag til natt atferd med skumring. Allerede kl 17 begynner fisken å gå dypere i merden og det er samtidig med at fôringsdagen slutter. Vi ser dermed at endringen i svømmedyp og tetthet både har en sammenheng med lyset og fôringen. Fisken syntes å foretrekke det varme vannet fremfor det kalde, spesielt på dagtid (se Figur 4.1.2a og 4.1.3).

Døgnvariasjon i svømmedyp og observert fisketetthet er vanlig å se i oppdrettsmerder og kan skyldes fôringsaktivitet om dagen kontra natten og/ eller ulike lysforhold som igjen er med å endre fiskens svømmeaktivitet. Ulike preferanser for temperatur og saltholdighet er tidligere dokumentert i merder. Avveiing mellom flere faktorer i merden er bestemmende for fiskens svømmedyp og tetthet i merder (se generell diskusjonen).

4.1.3. Ammoniakk og karbondioksid

På grunn av tekniske problemer med vannhenteren ble ikke hele måleprogrammet gjennomført på denne lokaliteten. Det ble gjennomført målinger 18.30 og 03.30. Generelt var ammoniakk målingene langt under det som antas å være skadelig for fisken, som er over 50 µg/l. Dypt i merden var det lite fisk og ofte ikke registrerbare verdier. I merd 3 varierte verdiene fra 1,46 – 0,09 µg/l på ulike dyp kl 1830. Klokken 0330 var det bare målbare verdier på 0,5 og 2 m som var henholdsvis 0,61 og 0,26 µg/l. I M4 klokken 1830 var verdiene på 0,5, 2 og 5 m dyp, henholdsvis 0,81 0,94 og 0,84 µg/l og 0330 var verdiene på 0,5 og 2 m henholdsvis 0,49 og 0,14 µg/l og ikke målbare dypere i merden.

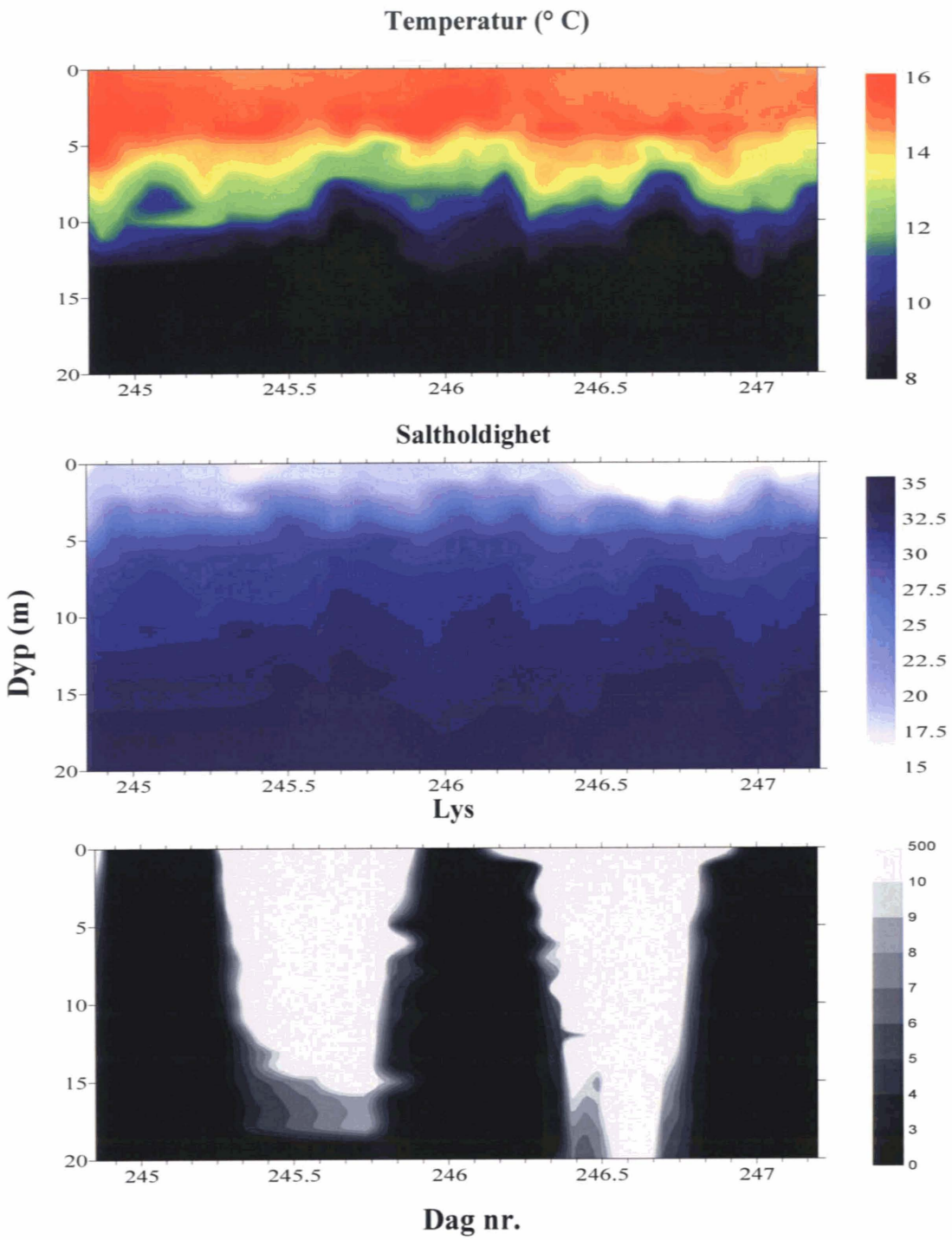
Målinger av karbondioksid ble bare foretatt 0330 og verdiene økte fra 0,48 til 1,69 mg/l fra 0,5 til 10 m i M3 og tilsvarende fra 0,92 til 3,12 mg/l i M4. Dette kan gjenspeile den noe dypere fordelingen av fisk om natten, men igjen er dette verdier som ligger langt under det som anses å være skadelig for fisk, ca 10 mg/l.

4.1.4 Vannstrøm, oksygenfluks og oksygenmetning

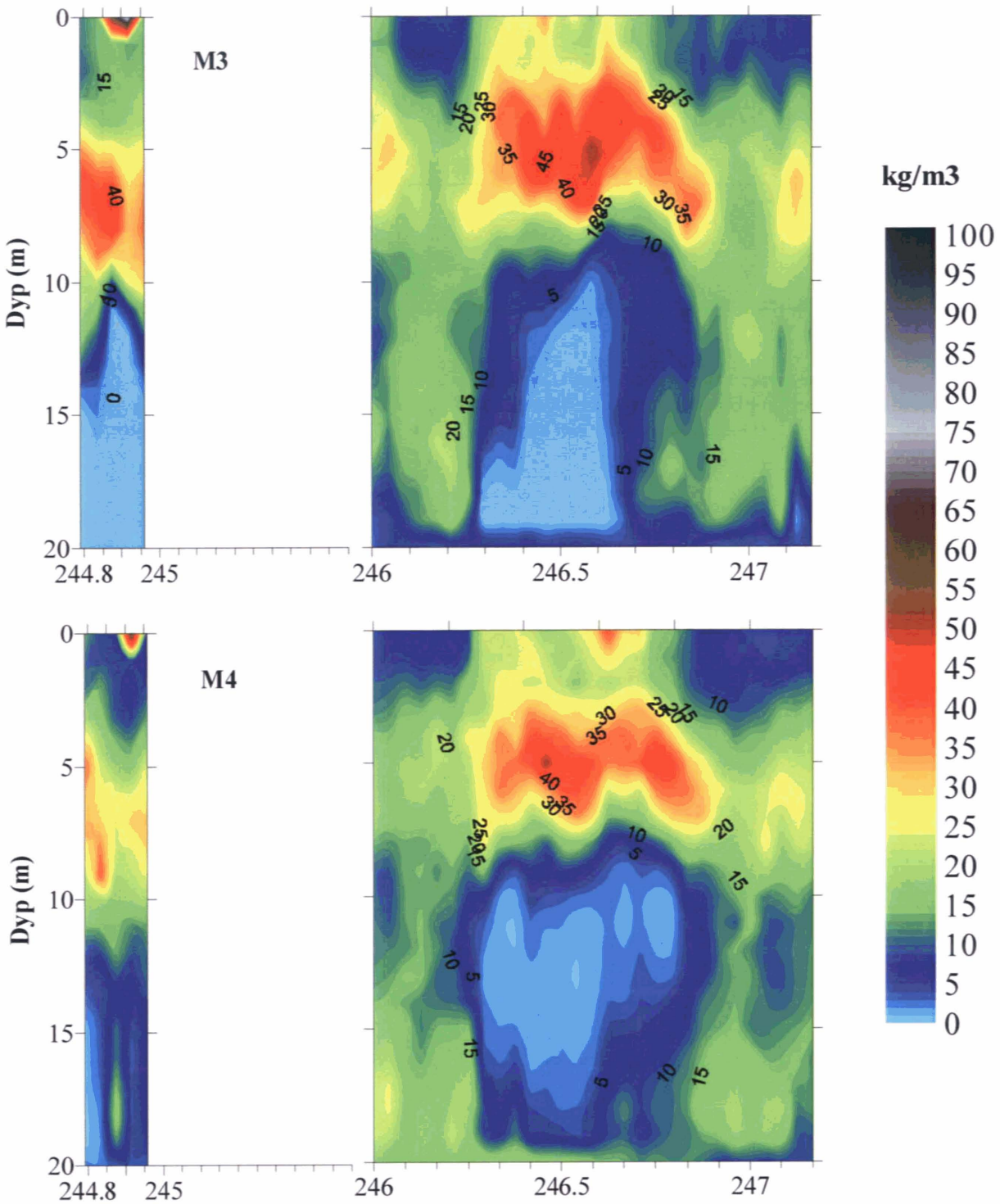
Retningen og hastigheten på vannstrømmen på utsiden og innsiden av merdanlegget avvek fra referansepunktet (Figur 4.1.4). Som vist i Figur 4.1.5a omfattet observasjonsperioden fire halvdaglige tidevannssykluser. Figur 4.1.5b viser strømhastighetene og Figur 4.1.5c viser vannstrømmens retning målt i referansepunktet. Hovedstrømmen i referansepunktet gikk i nordøstlig retning (57 grader). De horisontale strømhastighetene varierte fra 0 til 0.28 m/s, og var med få unntak spredd langs hovedstrømretningen. I det øvre vannlaget ned til 11 m dyp ser vi tydelig effekten av tidevann i referansepunktet. Som vist i Fig 4.1.5a gir dette en klar periodisk variasjon i oksygenfluks fra 0 til 5000 kg O_2 per time med et gjennomsnitt med 2186 kg O_2 per time. Under sprangsjiktet var tidevannseffekten kraftig dempet.

Tidevannseffekten er ikke like tydelig på innsiden og på utsiden av merdene. (Se også Appendiks). Målingene av vannstrøm nær anlegget ga et helt annet bilde enn referansepunktet. Hastighetene var kraftig dempet på begge målepunkt, med henholdsvis 57 og 71 % for innsiden og utsiden. På innsiden ble også middelretningen endret til en mer øst-sør-østlig retning. På utsiden var middelstrømmen i praksis lik 0. Dette ga en tilsvarende reduksjon i oksygenfluks.

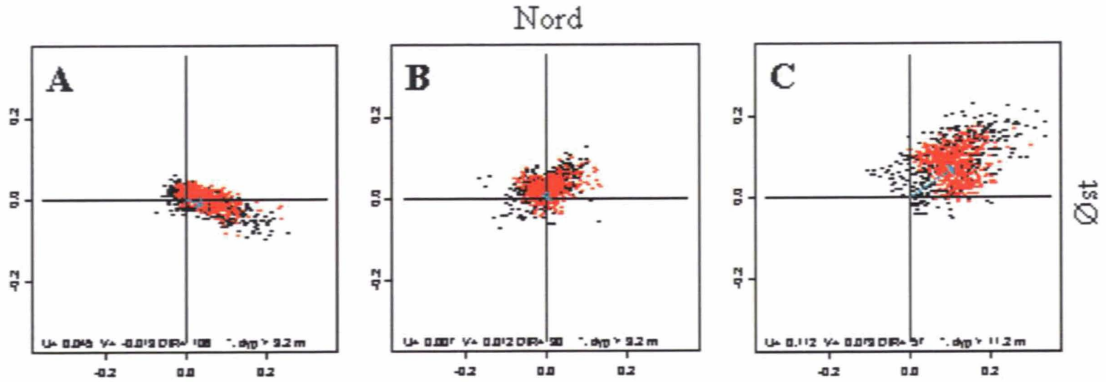
I teorien er oksygenmetning i merdene i hovedsak et resultat av konsentrasjonen i fri sjø (referansepunkt), vannstrømmen og fiskens forbruk. På denne lokaliteten var det i utgangspunktet en sterk vertikal gradient (se Figur 4.1.6b) i oksygenmetning i fri sjø (fra 107,8 -90,7% metning). Middelverdien i perioden var 98,6 (± 4,8). Dette førte til at det var konstant lave oksygenmetningsverdier i de nederste 10 m inne i merden til tross for at det sjelden var fisk der. I det volumet fisken oppholdt seg var det klare svingninger i oksygenmetning som kunne sees i sammenheng med den varierende strømstyrken på lokaliteten. I M3 varierte oksygenmetningen mellom 73,4 og 102,4 % med en gjennomsnittsverdi på 86,9 (± 7,4) % (Figur 4.1.6a,c). De tilsvarende verdiene for M4 var 69,1- 99,4 % med en gjennomsnittsverdi 86,4 (± 5,7) % (Figur 4.1.6a,d). De noe lavere verdiene i M4, på tross av noe lavere biomasse i denne merden, kan forklares med at den ligger i strømskyggen av M3 (se også tabell 5.1).



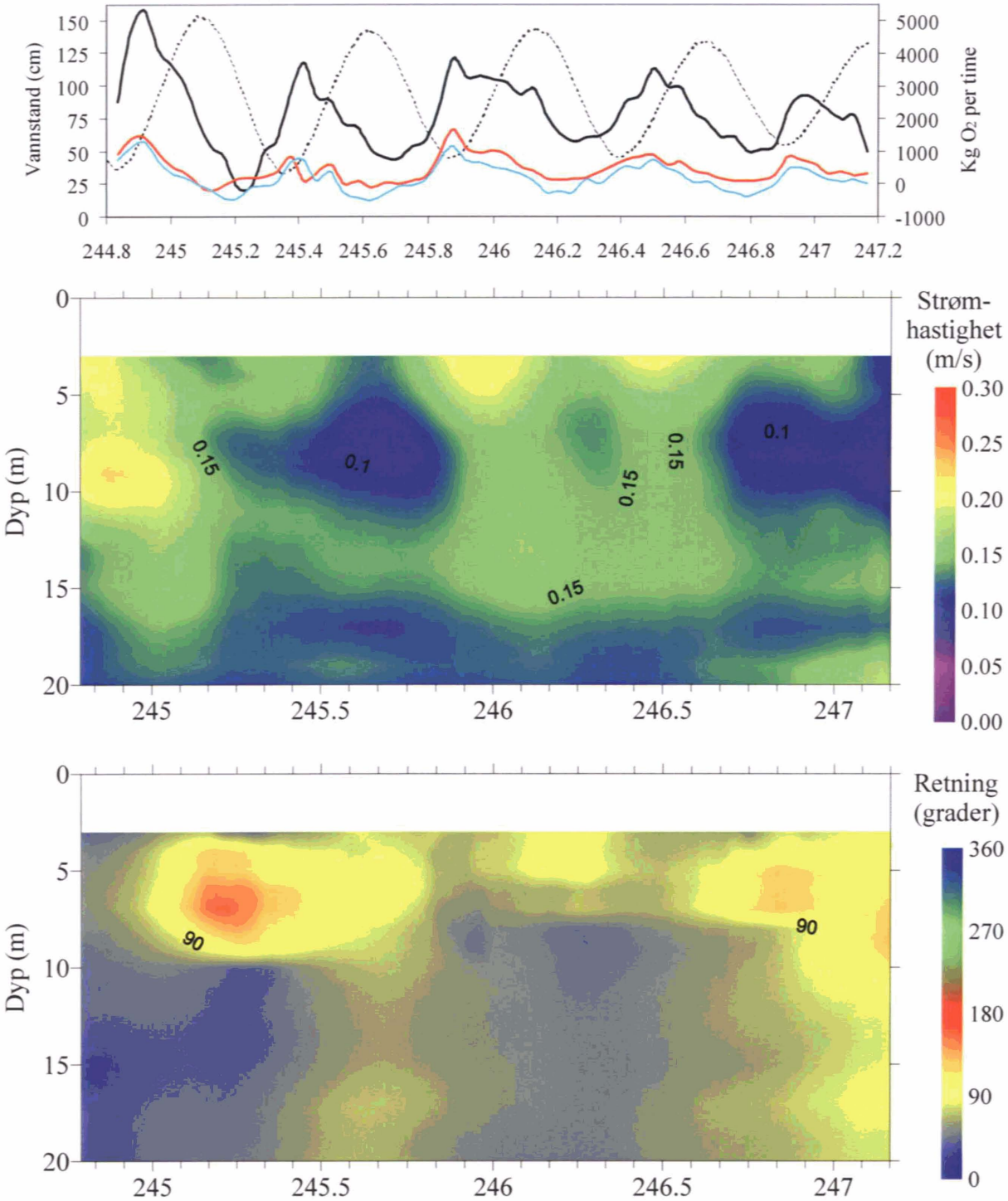
Figur 4.1.2a-c. Lokalitet 1 - "Fjord". Temperatur (°C), saltholdighet og lys (fotosyntetisk aktiv stråling (PAR) i $\mu E\ m^{-2}s^{-1}$) med den respektive fargeskalaen som viser verdi. Parametrene er registrert gjennom 50 timer i referansepunktet og y-aksen viser 0 til 20 meters dyp. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



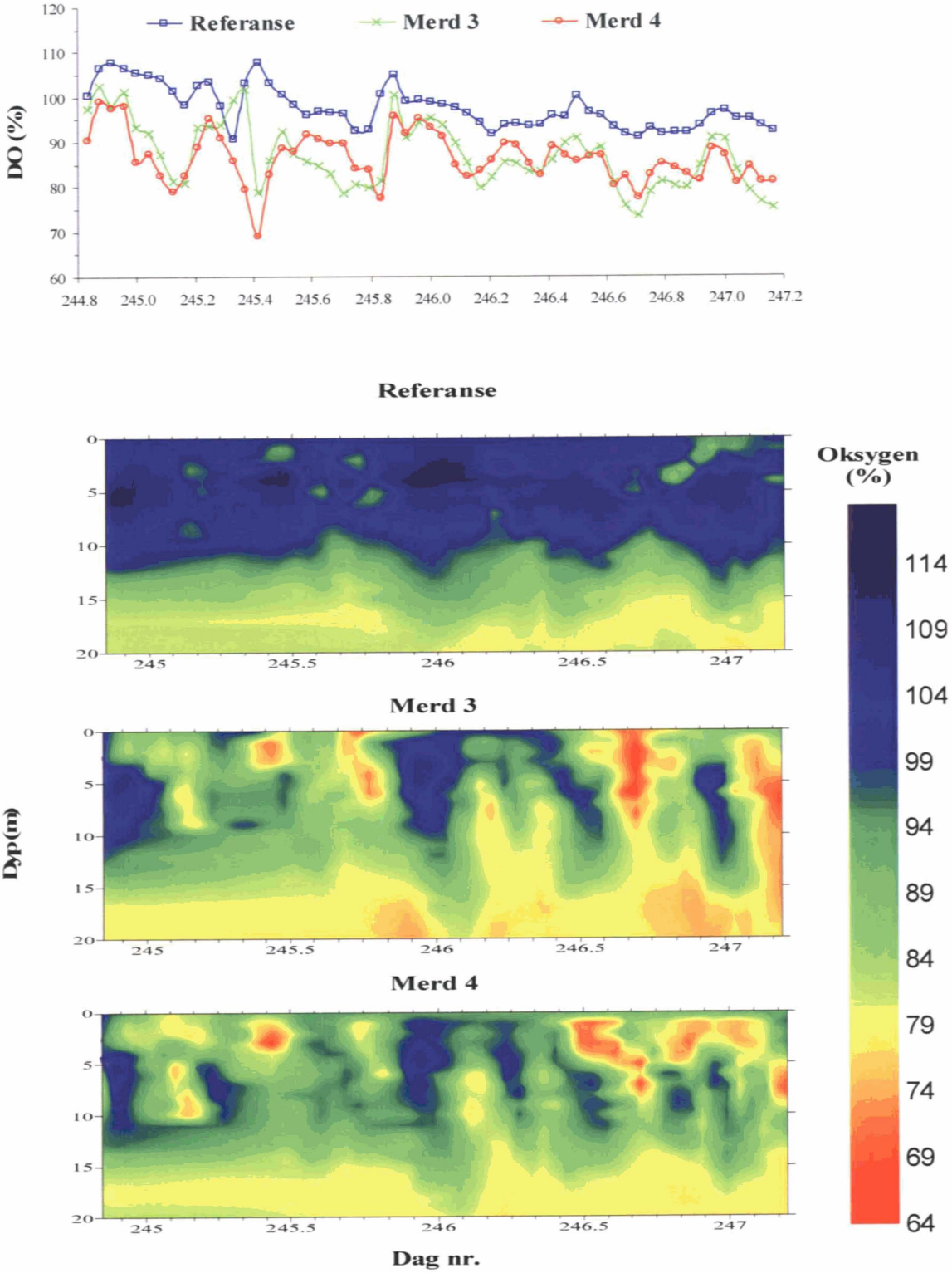
Figur 4.1.3.Lokalitet 1 "Fjord". Observert fisketetthet i forsøkskmerdene gjennom en 50 timers periode. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



Figur 4.1.4. Midlere strøm i 0-20 m dyp på Lokalitet 1. A er innsiden (inn), B er utsiden (ut) og C er referansepunktet. Hvert punkt representerer hastigheten midlet over 1 m og 1 time. Svarte og røde punkter er for posisjoner henholdsvis grunnere og dypere enn ca 10 m. Den blå pila indikerer midlere (over tid og dyp) hastighet og retning.



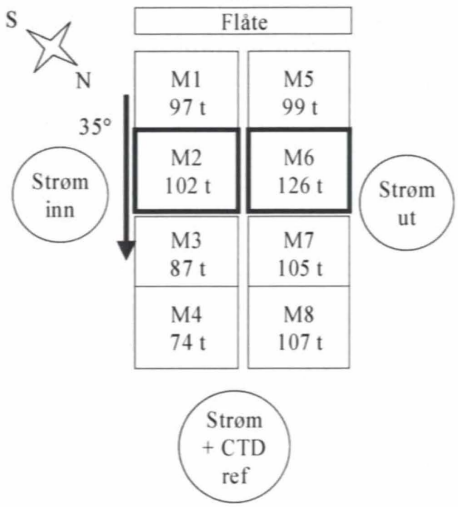
Figur 4.1.5. Lokalitet 1 –"Fjord". (a) Tidevannssyklus (m) for Bergen (stiplet linje) og beregnet oksygenfluks (kg O_2 per time) gjennom arealet av en merdvegg i referansepunktet (svart heltrukket linje) og på innsiden (rød) og utsiden (blå) av merdanlegget. (b) Strømhastighet i referansepunktet. (c) Strømretning i referansepunktet. Merk at målingene begynner på 4 m dyp. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.

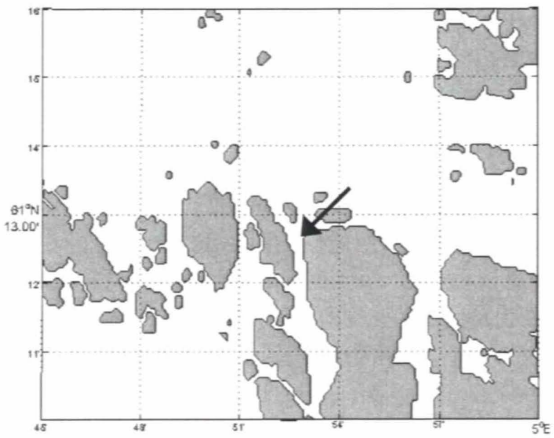


Figur 4.1.6. Lokalitet 1 – "Fjord". (a) Gjennomsnittlig oksygenmetning (%) i referansepunktet (blå) og de to forsøks merdene (rød og grønn) gjennom en 50 timers observasjonsperiode. Variasjon med dyp er vist for referansepunktet (b) og forsøksmerdene (c og d)

4.2. Lokalitet 2 – "Kyst"

Lokaliteten er en typisk kystlokalitet som ligger beskyttet fra Nordsjøen bak noen øyer.





Figur 4.2.1. Lokalitet 2 "Kyst". Skisse av anleggets utforming, biomasse og plassering av forsøksmerder (M2 og M6), referansepunkt og strømmålere. Pilen på kartutsnittet viser anleggets plasseringen

Anlegget ligger på vestsiden av et sund inn mot en mindre øy og er orientert 35° (NØ) og er et stålanlegg med åtte 25 x 25 m merder som var 20 m dype (til bunnlinen) og et volum på 12500 m^3 og en maskevidde på 28 omfar. Den totale biomassen på lokaliteten var ca 797 tonn med en gjennomsnittlig fiskestørrelse per merd fra 1,3 til 1,9 kg. Utfôring pågikk mellom klokken 0700-1700 mer eller mindre kontinuerlig med sentralforingsanlegg og visuell appetittregulering. Gjennomsnittlig formengde var ca 0,8 % per dag. Forsøksmerder var M2 og M6 og hadde i disse var den kalkulerte fisketettheten på henholdsvis 8,1 og 10,1 kg m^{-3}. CTD'er ble benyttet i disse merdene og i referansepunkt ca 30 m utenfor anlegget, mot NØ (se Figur 4.2.1).

4.2.1. Temperatur og saltholdighet

Saltholdighets målingene bekreftet at dette var en typisk kystlokalitet. Saltholdigheten varierte fra 31,3 – 34,3 med en middelverdi på 32,8 (± 0,7) og var relativ stabil gjennom hele perioden, men med et innsig av noe saltere vann i slutten av perioden (se Figur 4.2.2b). I starten av perioden var det en klar reduksjon av temperatur med kaldest vann i de nederste 5 meter. Utover i perioden økte temperaturen gradvis i overflaten og på slutten av perioden gjorde ett innsig av varmere vann at hele merdvolumet hadde en relativt jevn temperatur på rundt 12 °C. Ser man hele perioden under ett varierte temperaturen fra 8,1 – 12,6 °C med en middelverdi på 10,4 ± 1,1 °C (Figur 4.2.2a).

4.2.2. Svømmedyp og fisketetthet

Generelt unngikk fisken de dypeste delene av noten i begge merdene (Figur 4.2.3). Forskjeller i svømmedyp og fisketetthet mellom merdene var minimale, men med noe høyere verdier i merd 6 enn merd 2, noe som gjenspeiler den ulike biomassen (102 vs. 126 tonn). Mest markerte forskjeller i svømmedyp og observert fisketetthet var mellom dag og natt. Om dagen sto fisken samlet i øvre halvdel av merden med høy fisketetthet (20 til 35 kg m^{-3}, med den høyeste tettheten på 37 kg m^{-3}) og det ble nesten ikke observert fisk under 15 m dyp (minimum tetthet ned mot 0 kg m^{-3}). Om natten spredde fisken seg ut i større deler av merden med observerte fisketettheter på hovedsakelig under 20 kg m^{-3}. Tidspunktet for endring i atferd fra dag til natt stemmer overens med tiden for daggry (lysintensitet, Figur 4.2.2c) og fra

dag til natt atferd med skumring. Vi ser også at fisken øker svømmedypet etter foring er avsluttet kl .17 og dermed at endringen i svømmedyp og tetthet både har en sammenheng med lyset og fôringen. Det var betydelig kaldere vann dypt i merden i mesteparten av perioden (Figur 4.2.2a) noe som kan være med å forklare den lave fisketettheten dypt i merdene. Døgnvariasjon i svømmedyp og observert fisketetthet er vanlig å se i oppdrettsmerder og kan skyldes fôringsaktivitet om dagen kontra natten og/ eller ulike lysforhold som igjen er med å endre fiskens svømmeaktivitet. Avveiing mellom flere faktorer i merden er bestemmende for fiskens svømmedyp og tetthet i merder (se generell diskusjonen).

4.2.3. Ammoniakk og karbondioksid

Målingene ble gjennomført 5-6 september kl 1830, 2130 og 0030. Også på denne lokaliteten ble det målt lave verdier av ammoniakk. Generelt var ammoniakk nivåene langt under det som antaes å være skadelig for fisken, som er over 50 µg/l. Det var imidlertid klart mindre ammoniakk dypt i merden der det ikke var fisk. Gjennomsnitt av alle målingene viste 0,41 µg/l med enkeltmålinger som varierte fra 0,1 til 1,71 µg/l. Middelverdien på karbondioksid var 0,74 ± 0,18 mg/l. Igjen er dette verdier som ligger langt under det som anses å være skadelig for fisk, ca 10 mg/l.

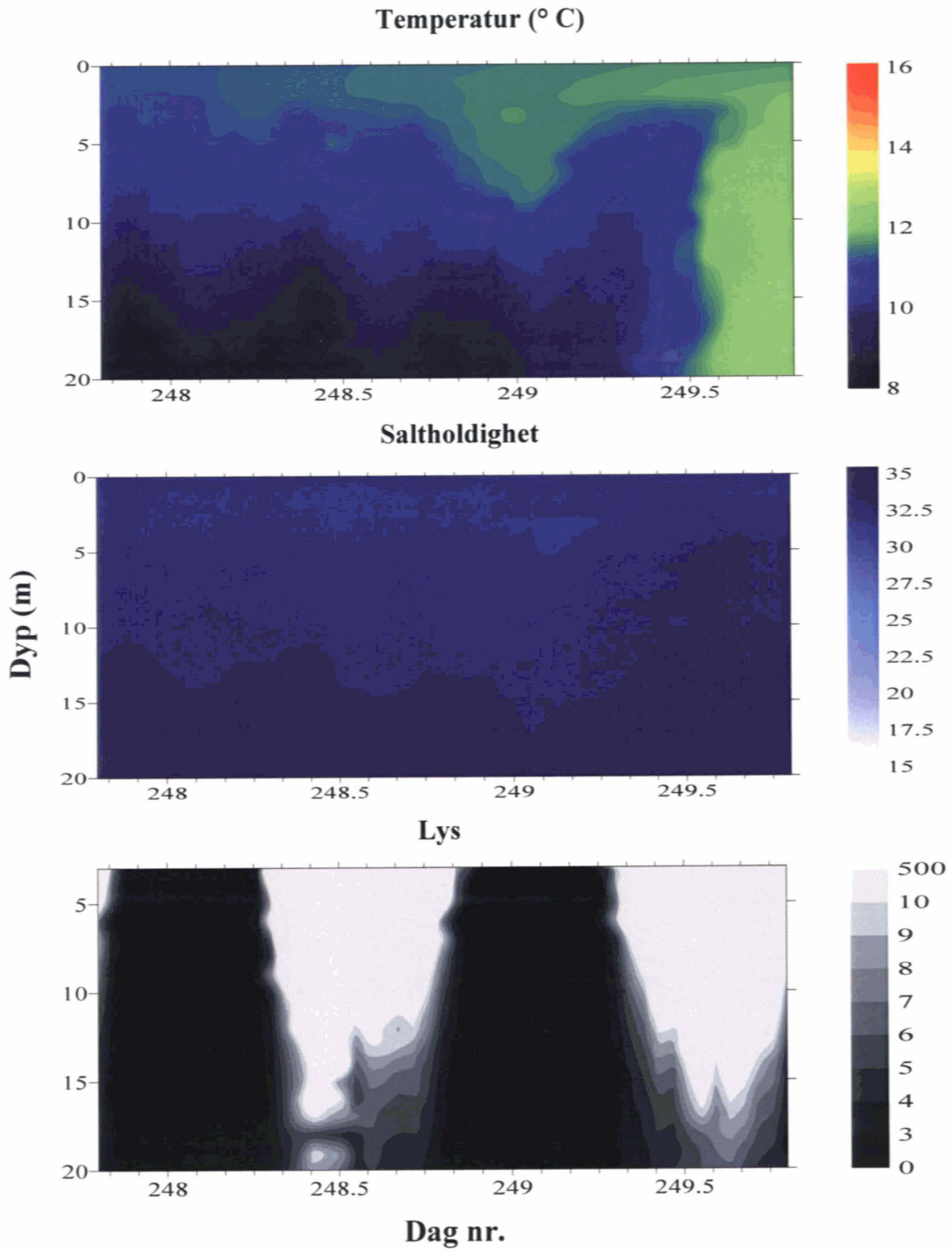
4.2.4. Vannstrøm, oksygenfluks og oksygenmetning

Retningen og hastigheten på vannstrømmen på utsiden og innsiden av merdanlegget avvek fra referansepunktet (Figur 4.2.4). På utsiden ble vannstrømmen kraftig dempet (60%) og det ble ikke observert en effekt av tidevann. På innsiden er bildet ett helt annet. Hastighetene er større og motsatt rettet referansepunktet. Dypere enn 10 m ser vi antydning til effekt av tidevann. De sterkeste strømmene er også dypere enn 10 m. Samtidig har vi kraftige vertikale hastigheter (opptil 0.12 cm/s), som ikke finnes på noen av de to andre målerne (Data ikke vist). Styrken på vertikalhastighetene ser ut til å korrespondere med styrken i tidevannssignalet. Det kan også se ut til at strømmen på innsiden som går i hovedstrømretning stopper opp og blir presset mot nord av merdveggen.

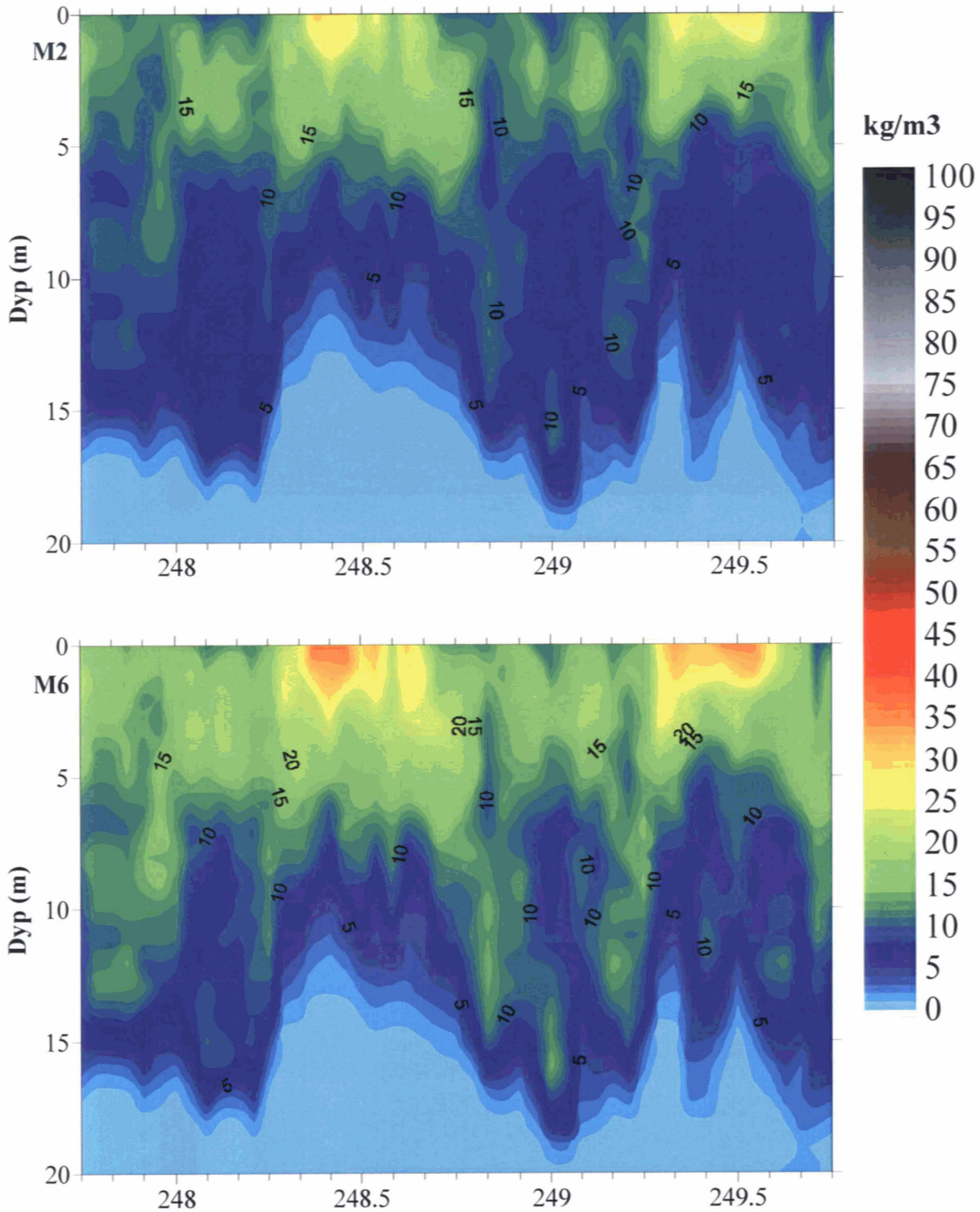
Som vist i Figur 4.2.5a omfattet observasjonsperioden fire halvdaglige tidevannssykluser. Figur 4.2.5b viser strømhastighetene og Figur 4.2.5c viser vannstrømmens retning målt i referansepunktet. Det er en klar todeling av strømbildet i den første 2/3 av måleperioden. Dypere enn 10 m dyp var det en stabil og sterk strøm, mens det i det øvre laget var en svakere strøm med mer varierende retning. I begge lag ser vi en effekt av tidevannet, men dette svekkes dypere enn 15 m. Strømhastighetene varierte fra 0 til 0.24 m/s gjennom måleperioden, med en hovedsakelig nordvestlig strømretning (329 grader). Mot slutten av perioden får vi en endring til vestlig strøm med svake hastigheter fra 0-20 m dyp. Sett i sammenheng med temperaturendringen tyder dette på av vi fikk inn en ny varmere vannmasse fra øst.

Figur 4.2.5a tyder på at det var en svak sammenheng mellom oksygenfluks og tidevann. På lokalitet 2 var det, (i likhet med lokalitet 1) også en sterk vertikal gradient (se Figur 4.2.6b) i oksygenmetning i fri sjø (fra 106,8 -90,3 % metning). Denne gradienten forsvant i slutten av perioden når det ble ett innsig av varmere og saltere vann. Middelverdien i perioden var 99,9 (± 4,0). Dette førte til at det var konstant ganske lave oksygenmetnings verdier i de nederste 10 m inne i merden til tross for at det sjelden var fisk der. I volumet fisken stod var det klare svingninger i oksygenmetning som kunne ses i sammenheng med det varierende strømstyrken på lokaliteten. I M2 varierte oksygenmetningen mellom 82,6 og 101,5 % med en gjennomsnittsverdi på 93,6 (± 4,6) % (Figur 4.2.6d). De tilsvarende verdiene for M6 var 79,6-103,6 % med en gjennomsnittsverdi 94,4 (± 6,2) % (Figur 4.2.6c). I og med at M6 lå på

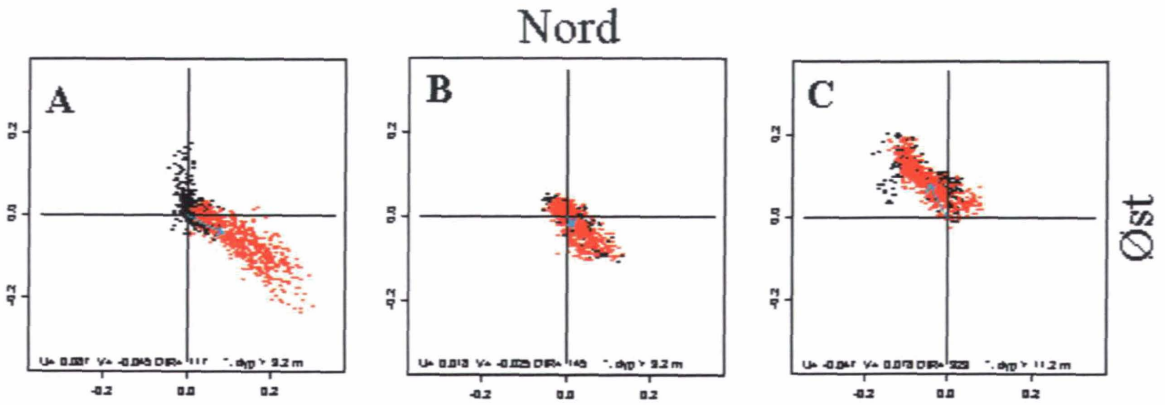
lesiden av hovedstrømretning og hadde en noe høyere biomasse enn M2 skulle en forvente en noe dårligere O_2 forhold der. Det er store svingninger i oksygen i merdene over tid med lave verdier sent på natten (Figur 4.2.6a). På denne tiden er det større forskjell mellom merdene og referansepunktet.



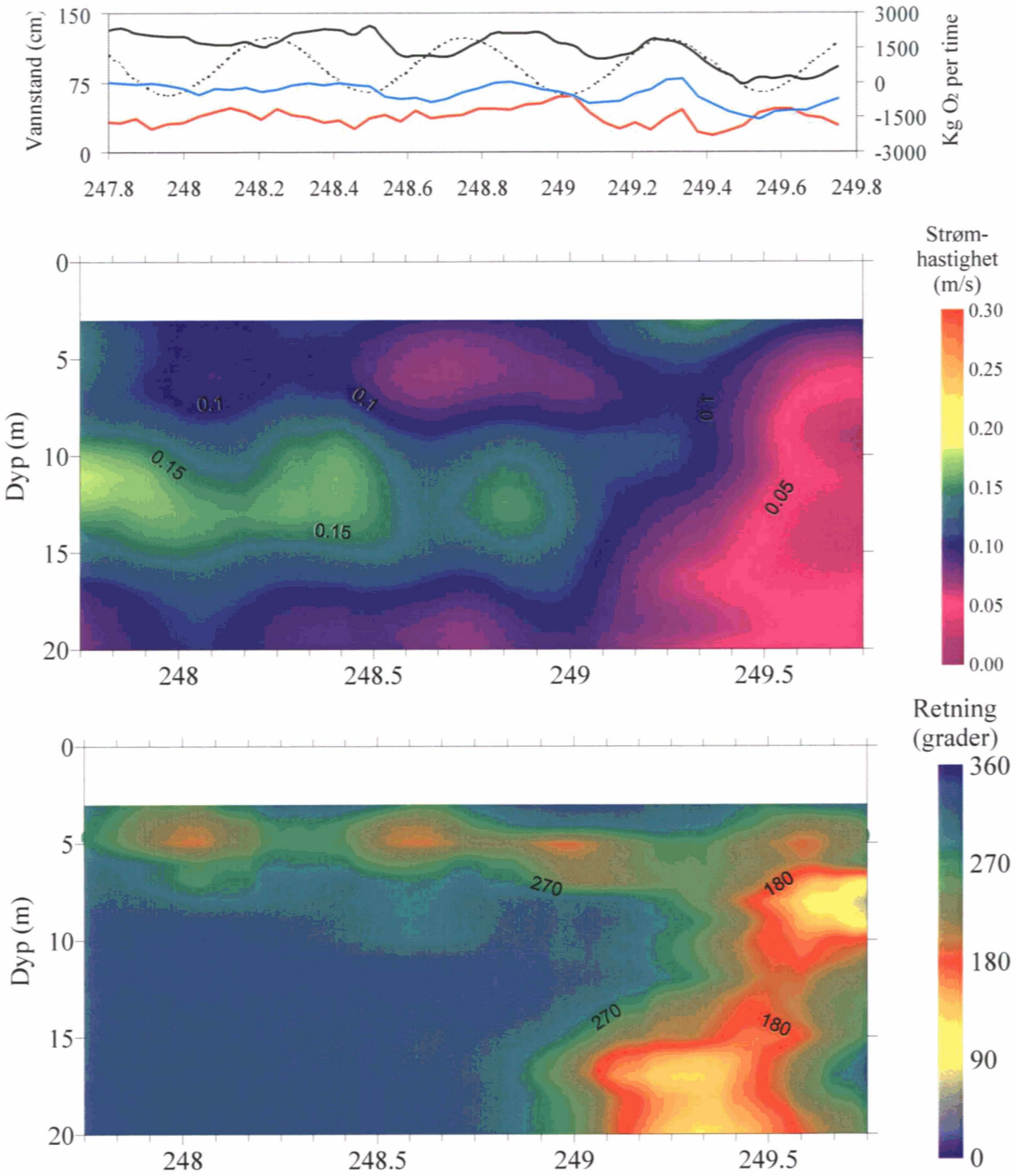
Figur 4.2.2a-c. Lokalitet 2 - "Kyst". Temperatur (°C), saltholdighet og lys (fotosyntetisk aktiv stråling (PAR) i $\mu E\ m^{-2}s^{-1}$) med den respektive fargeskalaen som viser verdi. Parametrene er registrert gjennom 50 timer i referansepunktet og y-aksen viser 0 til 20 meters dyp. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



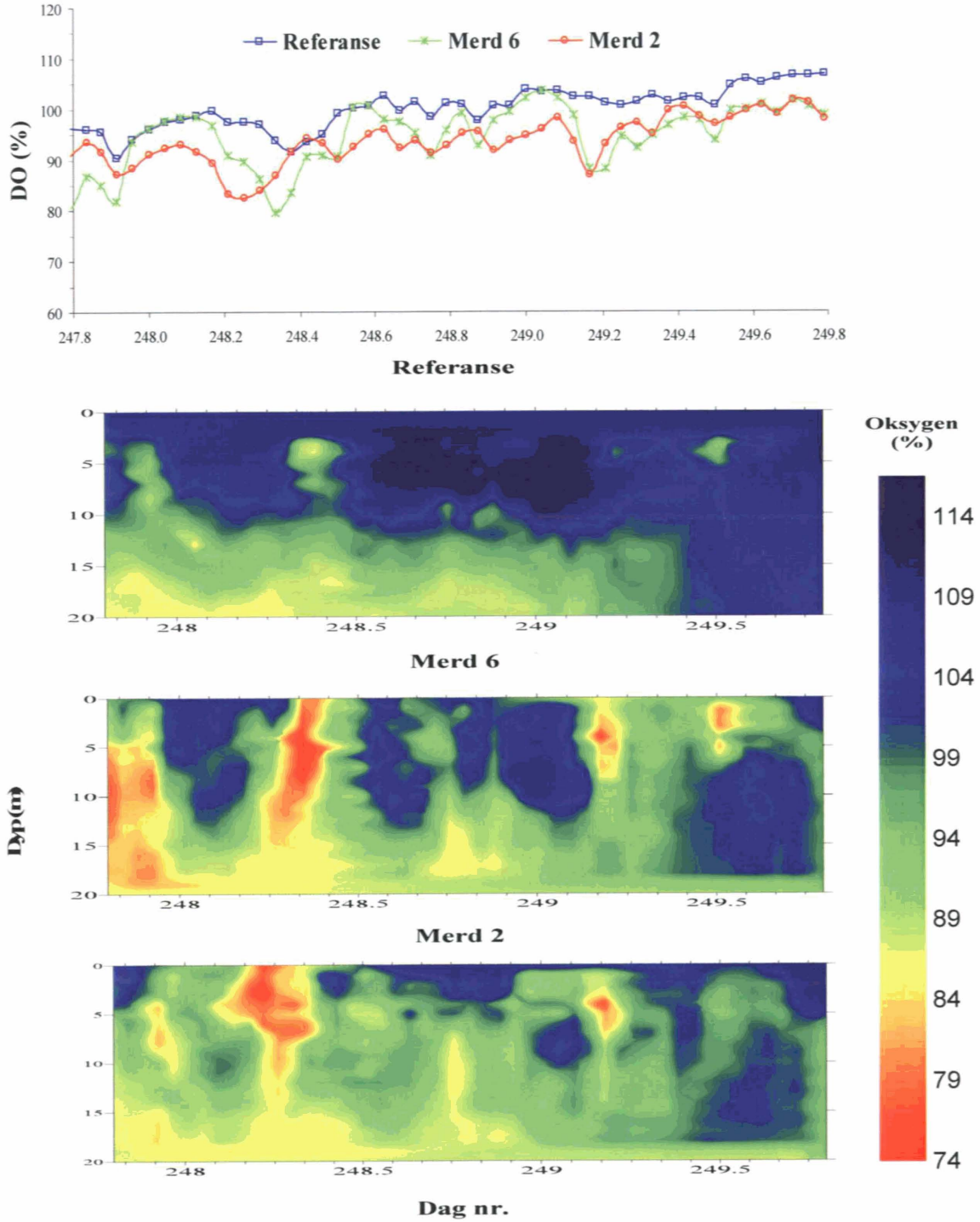
Figur 4.2.3. Lokalitet 2 "Kyst". Observert fisketetthet i forsøkskmerdene gjennom en 50 timers periode. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



Figur 4.2.4. Midlere strøm i 0-20 m dyp på Lokalitet 2. A er innsiden (inn), B er utsiden (ut) og C er referansepunktet. Hvert punkt representerer hastigheten midlet over 1 m og 1 time. Svarte og røde punkter er for posisjoner henholdsvis grunnere og dypere enn ca 10 m. Den blå pila indikerer midlere (over tid og dyp) hastighet og retning.



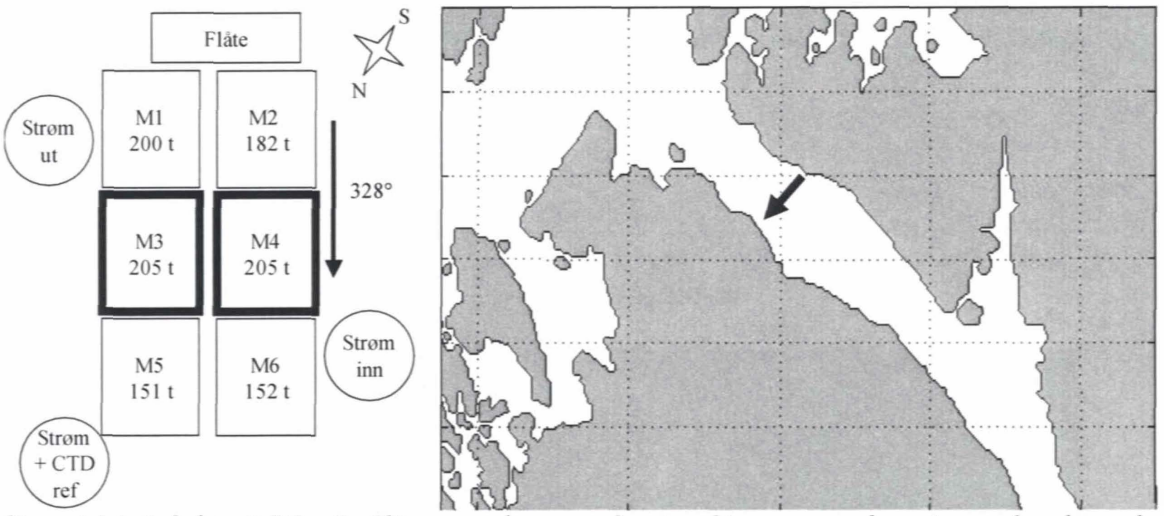
Figur 4.2.5. Lokalitet 2 – "Kyst". (a) Tidevannssyklus (m) for Bergen (stiplet linje) og beregnet oksygenfluks (kg O_2 per time) gjennom arealet av en merdvegg i referansepunktet (svart heltrukket linje) og på innsiden (rød) og utsiden (blå) av merdanlegget. (b) Strømhastighet i referansepunktet. (c) Strømretning i referansepunktet. Merk at målingene begynner på 4 m dyp. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



Figur 4.2.6. Lokalitet 2 – "Kyst". (a) Gjennomsnittlig oksygenmetning (%) i referansepunktet (blå) og de to forsøks merdene (rød og grønn) gjennom en 50 timers observasjonsperiode. Variasjon med dyp er vist for referansepunktet (b) og forsøksmerdene (c og d)

4.3. Lokalitet 3 – "Kyst"

Lokaliteten ligger i et større sund som har kontakt med større fjordsystemer, men er likevel definert som en kystlokalitet fordi den er relativt upåvirket av ferskvannsavrenning.



Figur 4.3.1. Lokalitet 3 "Kyst". Skisse av anleggets utforming, biomasse og plassering av forsøksmerder (M3 og M4), referansepunkt og strømmålere. Pilen på kartutsnittet viser anleggets plasseringen

Anlegget ligger på vestsiden av et sund inn mot en større øy på kysten og er orientert 328° (NV). På lokaliteten er det et stålanlegg med seks 25 x 35 m merder som var gjennomsnittlig 25 m dype (til bunnlinen) og et volum på 21875 m^3. Dypet under merdene var ca 80 til 120 m. Den totale biomassen på lokaliteten var ca 1095 tonn med en gjennomsnittlig fiskestørrelse i merdene på 1,8 til 1,9 kg. Utfôring pågikk mellom kl 0715-1400 mer eller mindre kontinuerlig med sentralfôringsanlegg og visuell appetittregulering. Gjennomsnittlig fôrmengde var 1 % per dag. Forsøksmerder var M3 og M4 og hadde begge en kalkulert fisketetthet på 9.4 kg m^{-3}. CTD'er ble benyttet i disse merdene og i referansepunkt ca 10 m utenfor anlegget, mot NV (se Figur 4.3.1).

4.3.1. Temperatur og saltholdighet

Saltholdighetsmålingene bekreftet at dette var en typisk kystlokalitet. Saltholdigheten varierte fra 33,9 – 28,8 med en middelverdi på 32,6 (± 0,9) og var relativ stabil gjennom hele perioden (se Figur 4.3.2b). Også temperaturen var stabil og homogen i hele perioden og varierte fra 13,8 – 15,4 °C med en middelverdi på 15,1 ± 0,2 °C (se Figur 4.3.2a).

4.3.2. Svømmedyp og fisketetthet

Svømmedypet og den observerte fisketettheten viste store variasjoner gjennom perioden (Figur 4.3.3). Da dette var et nytt anlegg der merdene ikke var ferdig nedloddet ble det i perioder observert mye bevegelse i noten. En god del av variasjonen i svømmedyp kan derfor skyldes såkalt 'notatferd' som innebærer bevegelser i noten som presser fisken. Det var store forskjeller mellom merdene hvor merd 3 hadde mest 'notatferd'. Dette stemmer overens med at strømmens retning var inn mot merd 3. Mest markerte forskjeller i svømmedyp og observert fisketetthet så vi mellom dag og natt i merd 4. Om natten sto fisken mer samlet i øvre halvdel av merd 4 med høy fisketetthet (opp til 25 kg m^{-3}). Om dagen spredde fisken seg ut i større deler av merden med observerte fisketettheter på hovedsakelig under 20 kg m^{-3}. Tidspunktet for endring i atferd fra dag til natt stemmer mer eller mindre overens med tiden for daggry (lysintensitet, Figur 4.3.2c) og fra dag til natt atferd med skumring. Fisken går noe dypere etter at fôringstiden er over, men bildet er noe uklart. Endringene i svømmedyp og

tetthet har fremfor alt en sammenheng med lyset og på dette anlegget antaes en del 'notatferd'. Temperatur- og saltholdighetsvariasjonen (Figur 4.3.2a,b) i merden er relativt beskjeden og vi ser ingen klare sammenhenger mellom disse, svømmedyp og fisketetthet.

Døgnvariasjon i svømmedyp og observert fisketetthet er vanlig å se i oppdrettsmerder og kan skyldes fôringsaktivitet om dagen kontra natten og/ eller ulike lysforhold som igjen er med å endre fiskens svømmeaktivitet. Avveiing mellom flere faktorer i merden er bestemmende for fiskens svømmedyp og tetthet i merder (se generell diskusjonen).

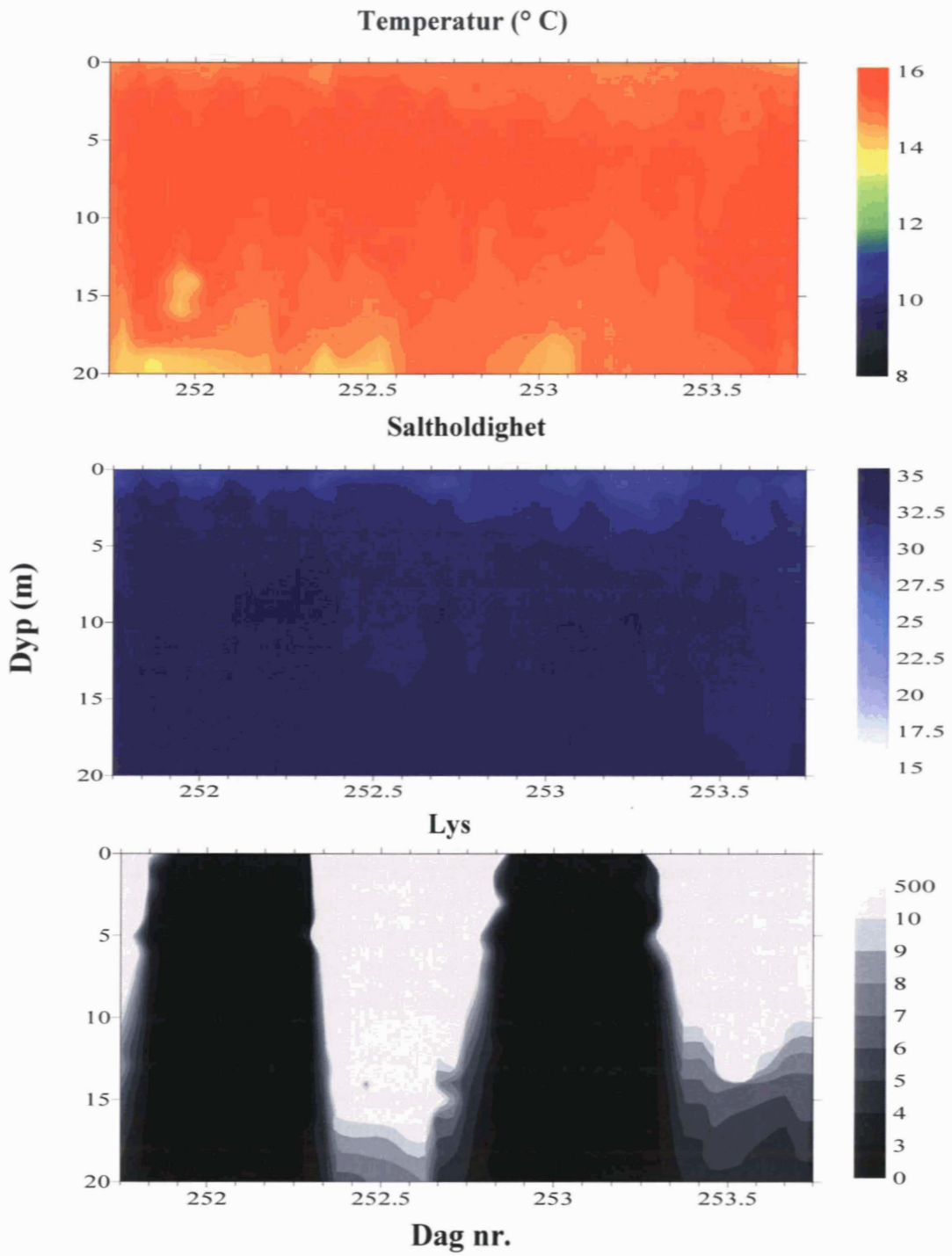
4.3.3. Ammoniakk og karbondioksid

Målingene ble gjennomført 9-10 september kl 17, 20, 23 og 02. Denne lokaliteten hadde meget lave verdier av ammoniakk, med et gjennomsnitt på 0,14 µg/l. Generelt antaes ammoniakk nivåer over 50 µg/l å være skadelig for fisken. Middelverdien på karbondioksid var 1,17 ± 0,25 mg/l. Igjen er dette verdier som ligger langt under det som anses å være skadelig for fisk (10 mg/l).

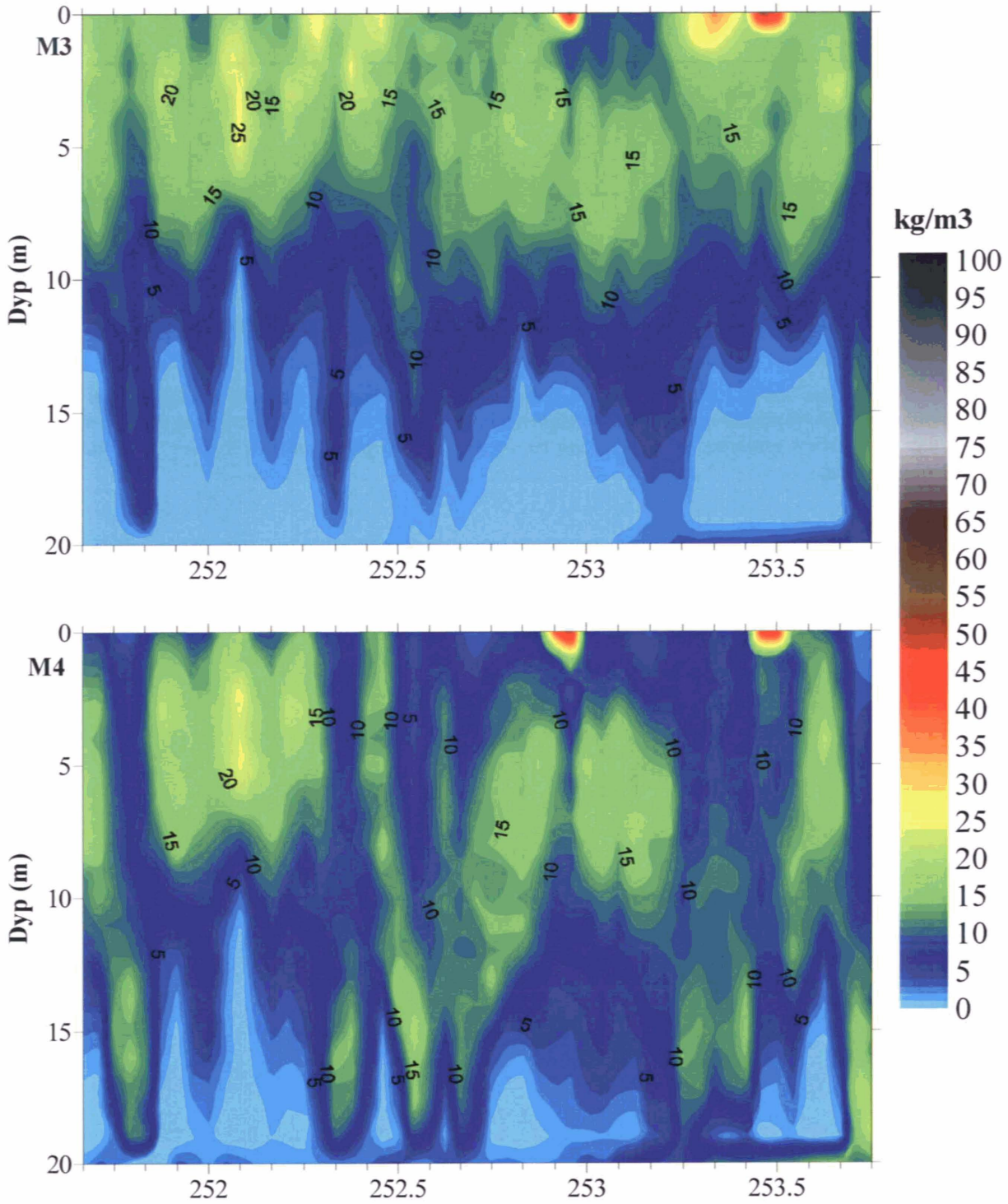
4.3.4. Vannstrøm, oksygenfluks og oksygenmetning

På denne lokaliteten var det en stabil SØ strømretning (127 grader) i hele dypet. Denne strømmen gikk altså i anleggets lengderetning. På slutten av perioden dreide strømmen noe mer rett sørlig, samtidig som strømhastigheten avtok noe. Strømhastigheten avtok jevnt gjennom måleperioden, og varierte fra 0.04 til 0.36 m/s. Figur 4.3.5.b viser strømhastighetene og Figur 4.3.5.c viser vannstrømmens retning målt i referansepunktet. Retningen og hastigheten på vannstrømmen på utsiden og innsiden av merdanlegget avvek fra referansepunktet (Figur 4.3.4). Strømretningen på innsiden og utsiden var mer konsentrerte i hovedstrømretningen, som også var langsmed anlegget. Det kan virke som om strømmen i all hovedsak ble styrt rundt anlegget, og at sidebevegelser ble dempet av anleggets sidevegger. Strømmen på utsiden ble mest dempet, og har i midten av måle perioden motsatt retning av referansemåleren (se Appendiks og Figur 4.3.5c). Dette sammenfaller med en periode med sterkere strøm på referansepunktet (Figur 4.3.5b). Dempningen var 41% og 73% på hhv innsiden og utsiden relativt til referansestrømmen. Som vist i Figur 4.3.5a omfattet observasjonsperioden fire halvdaglige tidevannssykluser. Det var ikke mulig å se noen effekt av tidevannet.

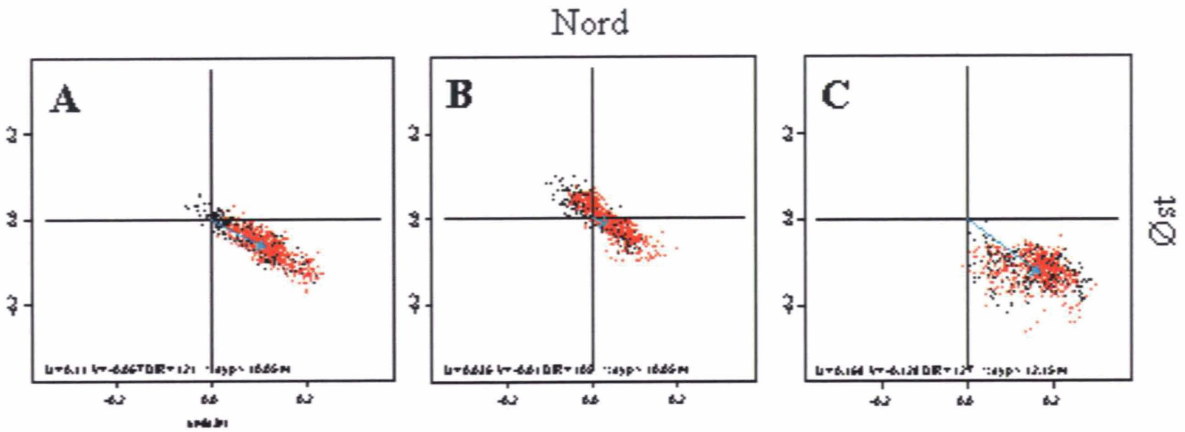
Figur 4.3.5a tyder på at det ikke var noen klar sammenheng mellom oksygenfluks og tidevann. På denne lokaliteten var det lite variasjon i oksygenmetning i fri sjø (fra 102,4 –98,7 % metning) både med tid og dyp (Figur 4.3.6a,b) Også inne i merdene var oksygenmetningen relativ stabil. I M4 varierte oksygenmetningen mellom 75,9 og 101,2 % med en gjennomsnittsverdi på 93,9 (± 5,3) % (Figur 4.3.6c). De tilsvarende verdiene for M3 var mellom 92,8 og 103,8 % med en gjennomsnittsverdi på 98,7 (± 2,4) % (Figur 4.3.6d). I og med at M4 lå på lesiden av hovedstrømretning kan dette være forklaring på de lavere verdiene. Det var en markant reduksjon i oksygenmetning i M4 mot slutten av perioden (Figur 4.3.6a) samtidig som strømhastigheten avtok og det var en endring i retning som gjorde at M4 ble liggende mer i le av hovedstrømretning. Det var en tendens til at oksygenverdiene sank på natten. Generelt var oksygenforholdene stabile og gode på denne lokaliteten.



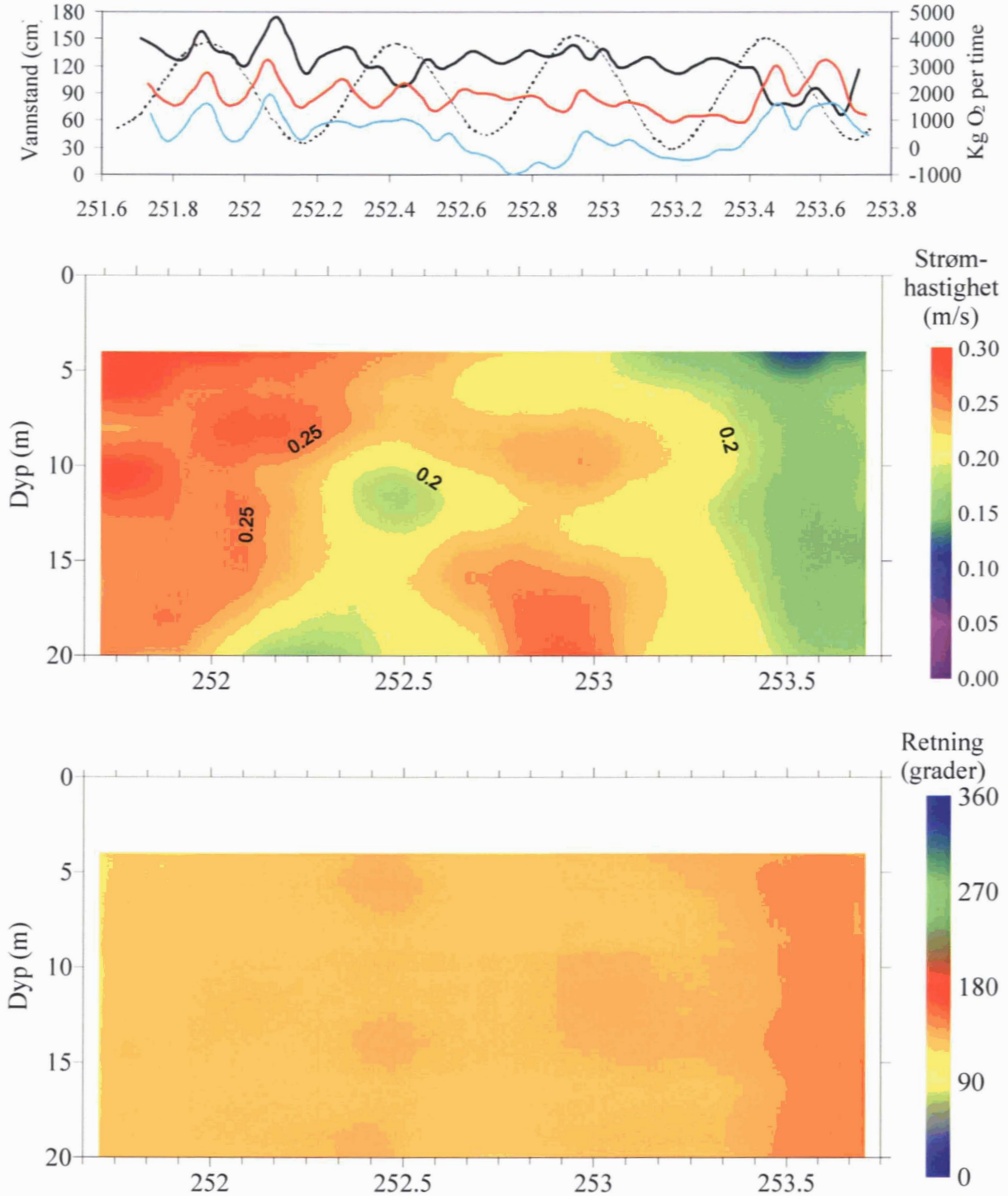
Figur 4.3.2a-c. Lokalitet 3 - "Kyst". Temperatur (°C), saltholdighet og lys (fotosyntetisk aktiv stråling (PAR) i µE $m^{-2}s^{-1}$) med den respektive fargeskalaen som viser verdi. Parametrene er registrert gjennom 50 timer i referansepunktet og y-aksen viser 0 til 20 meters dyp. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



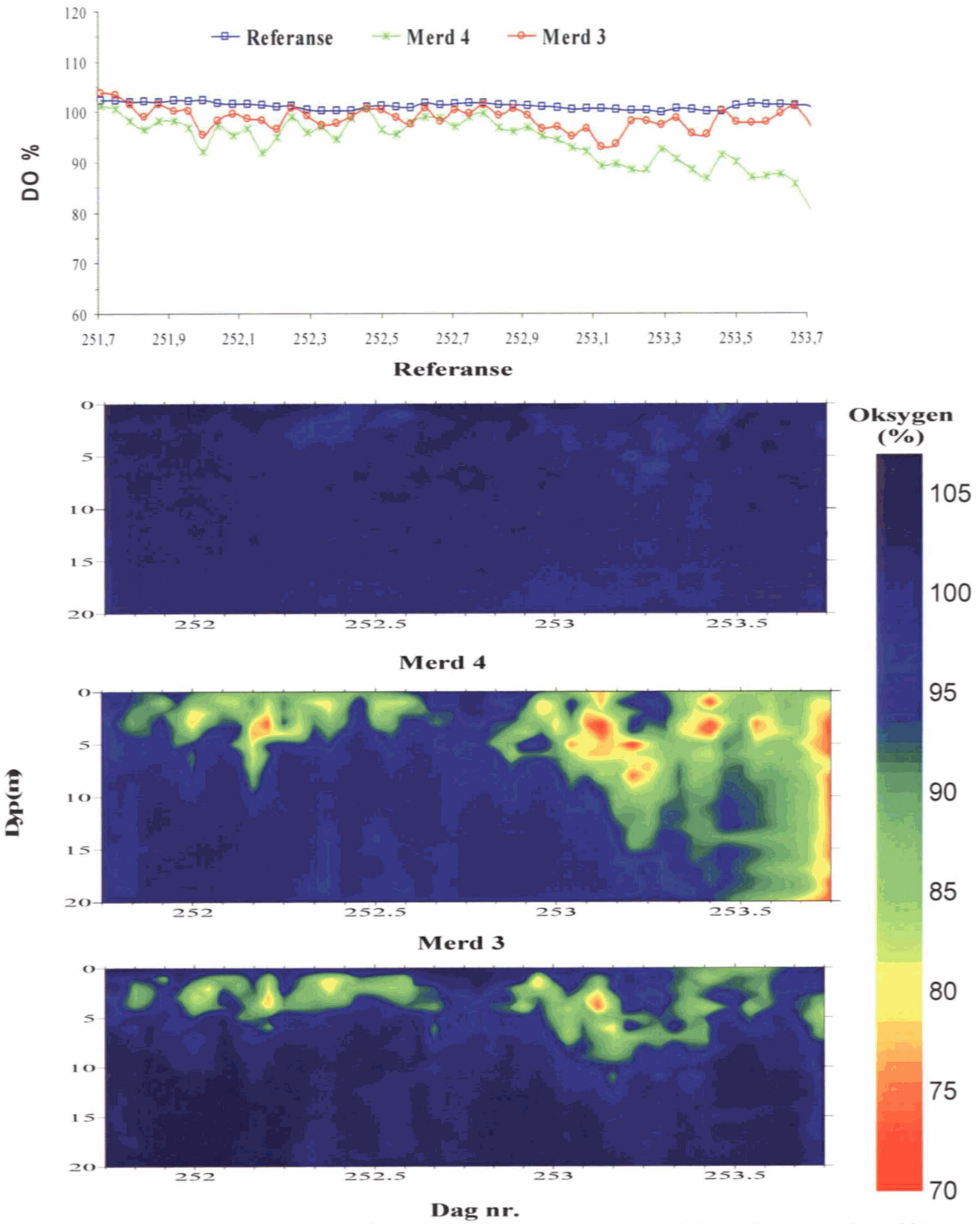
Figur 4.3.3. Lokalitet 3 "Kyst". Observert fisketetthet i forsøkskmerdene gjennom en 50 timers periode. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



Figur 4.3.4. Midlere strøm i 0-20 m dyp på Lokalitet 3. A er innsiden (inn), B er utsiden (ut) og C er referansepunktet. Hvert punkt representerer hastigheten midlet over 1 m og 1 time. Svarte og røde punkter er for posisjoner henholdsvis grunnere og dypere enn ca 10 m. Den blå pila indikerer midlere (over tid og dyp) hastighet og retning.



Figur 4.3.5. Lokalitet 3 – "Kyst". (a) Tidevannssyklus (m) for Bergen (stiplet linje) og beregnet oksygenfluks (kg O_2 per time) gjennom arealet av en merdvegg i referansepunktet (svart heltrukket linje) og på innsiden (rød) og utsiden (blå) av merdanlegget. (b) Strømhastighet i referansepunktet. (c) Strømretning i referansepunktet. Merk at målingene begynner på 4 m dyp. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



Figur 4.3.6. Lokalitet 3 – "Kyst". (a) Gjennomsnittlig oksygenmetning (%) i referansepunktet (blå) og de to forsøks merdene (rød og grønn) gjennom en 50 timers observasjonsperiode. Variasjon med dyp er vist for referansepunktet (b) og forsøksmerdene (c og d)

4.4. Lokalitet 4 – "Fjord"

Lokalitet 4 ble definert som en fjordlokalitet, men fjorden har ingen store elver og et lite nedbørsfelt rundt som dermed gir en relativ lav tilførsel av ferskvann.

Figur 4.4.1. Skisse av anleggets utforming, biomasse og plassering av forsøksmerder (M5 og M6), referansepunkt og strømmålere. Kartutsnitt hvor plasseringen av Lokalitet 4 er markert med pil.

Anlegget ligger på nordsiden av fjorden og er et landtilknyttet stålanlegg med tolv 25 x 25 m merder som var 20 m dype (til bunnlinen) og et volum på 12500 m^3, og maskevidde på 24 omfar. Dypet under merdene var ca 70 til 150 m. Den totale biomassen på lokaliteten var ca 1327 tonn med en gjennomsnittlig fiskestørrelse i hver merd fra 1,9 til 2,6 kg. Utfôring pågikk mellom kl 0700-1600 mer eller mindre kontinuerlig med Betten automater og visuell appetittregulering fra overflate og delvis med kamera. Gjennomsnittlig utfôringsprosent var 0,8 i perioden. Forsøksmerder var M5 og M6 og hadde en kalkulert fisketetthet på henholdsvis 11,7 og 12,8 kg m^{-3}. CTD'er ble benyttet i disse merdene og i referansepunkt ca 30 m utenfor anlegget, mot sør (se Figur 4.4.1). Vannstrømmen ble registrert i referansepunkt, ca 20 m utenfor M3 og M8.

4.4.1. Temperatur og saltholdighet

I utgangspunktet var dette definert som en fjordlokalitet. Saltholdighetsmålingene i perioden viste imidlertid at det er en relativt svak sjikting med saltholdighet som varierte fra 27,2 til 33,2 med et gjennomsnitt på 30,2 ± 1.0. Den svake sjiktingen kan skyldes lite nedbør og avrenning i de forutgående uker. Middeltemperaturen var 15,0 ± 0,3° C. I første halvdel av perioden var det en relativ homogen temperatur i hele merdens dybde, mens det i siste halvdel økte variasjonen med kaldere vann i overflaten og varmere vann i de dypeste delene. (Se Figur 4.4.2a,b)

4.4.2. Svømmedyp og fisketetthet

Svømmedypet og fisketettheten viste store variasjoner med tid og dyp i begge merdene, men innbyrdes var de relativt like. Lokale fisketettheter var opptil 4-5 ganger høyere enn kalkulert tetthet (maks tetthet: 56 kg m^{-3}, Figur 4.4.3). Mest markerte forskjeller i svømmedyp og observert fisketetthet var mellom dag og natt. På dagtid sto fisken med høyest tetthet i de dypeste delene av merden (12-20 m) samt med periodevis høye tettheter nær overflaten i forbindelse med fôring, særlig den andre dagen. I resten av merdvolumet var fisketettheten betydelig lavere. I skumringen hevet fisket seg noe og om natten stod fisken jevnere fordelt i merdvolumet enn på dagtid. Tidspunktet for endring i atferd fra dag til natt stemmer overens med tiden for daggry (lysintensitet, Figur 4.4.2c) og fra dag til natt atferd med skumring. Vi

så ikke noe utpreget endring i svømmedyp og fisketetthet ved slutten av fôringsperioden. Temperatur- og saltholdighetsvariasjonen (Figur 4.4.2a,b) i merden er relativt beskjeden og det var ingen klare sammenhenger mellom disse, svømmedyp og fisketetthet. Imidlertid var det stor variasjon i oksygenforholdene i merdene (Figur 4.4.6c,d) med spesielt lave oksygenverdier fra den andre natten av og frem til kl 9-10. I samme perioden unngår fisken dette området. Vi ser dermed at endringene i svømmedyp og tetthet hovedsakelig har en sammenheng med lyset og oksygenforholdene.

Døgnvariasjon i svømmedyp og observert fisketetthet er vanlig å se i oppdrettsmerder og kan skyldes fôringsaktivitet om dagen kontra natten og/ eller ulike lysforhold som igjen er med å endre fiskens svømmeaktivitet. Ulike preferanser for temperatur og saltholdighet er tidligere dokumenter i merder. Avveiing mellom flere faktorer i merden er bestemmende for fiskens svømmedyp og tetthet i merder (se generell diskusjonen).

4.4.3 Ammoniakk og karbondioksid

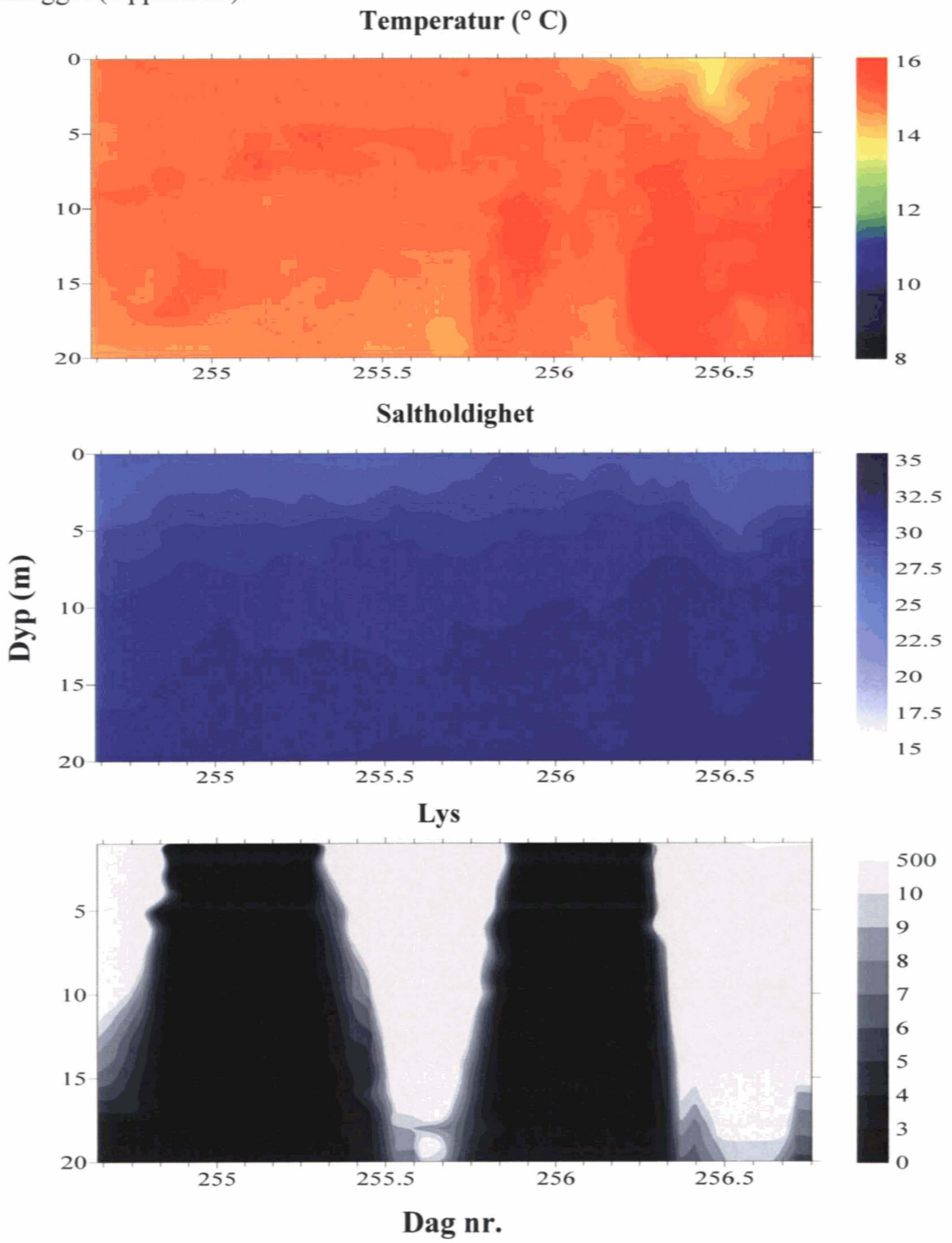
Målingene av ammoniakk og CO_2 viste lave verdier, som var langt unna det som kan vurderes som skadelig for fisken. Giftige nivå av ammoniakk er over 50 µg/l og gjennomsnittlige nivåer i de to merdene varierte mellom 0,6 ± 0,4 og 2,5 ± 2,7 µg/l. Tilsvarende lå CO_2 verdiene langt under (1,5 ± 0,1 mg/l) grenseverdien på 10 mg/l.

4.4.4. Vannstrøm, oksygenfluks og oksygenmetning

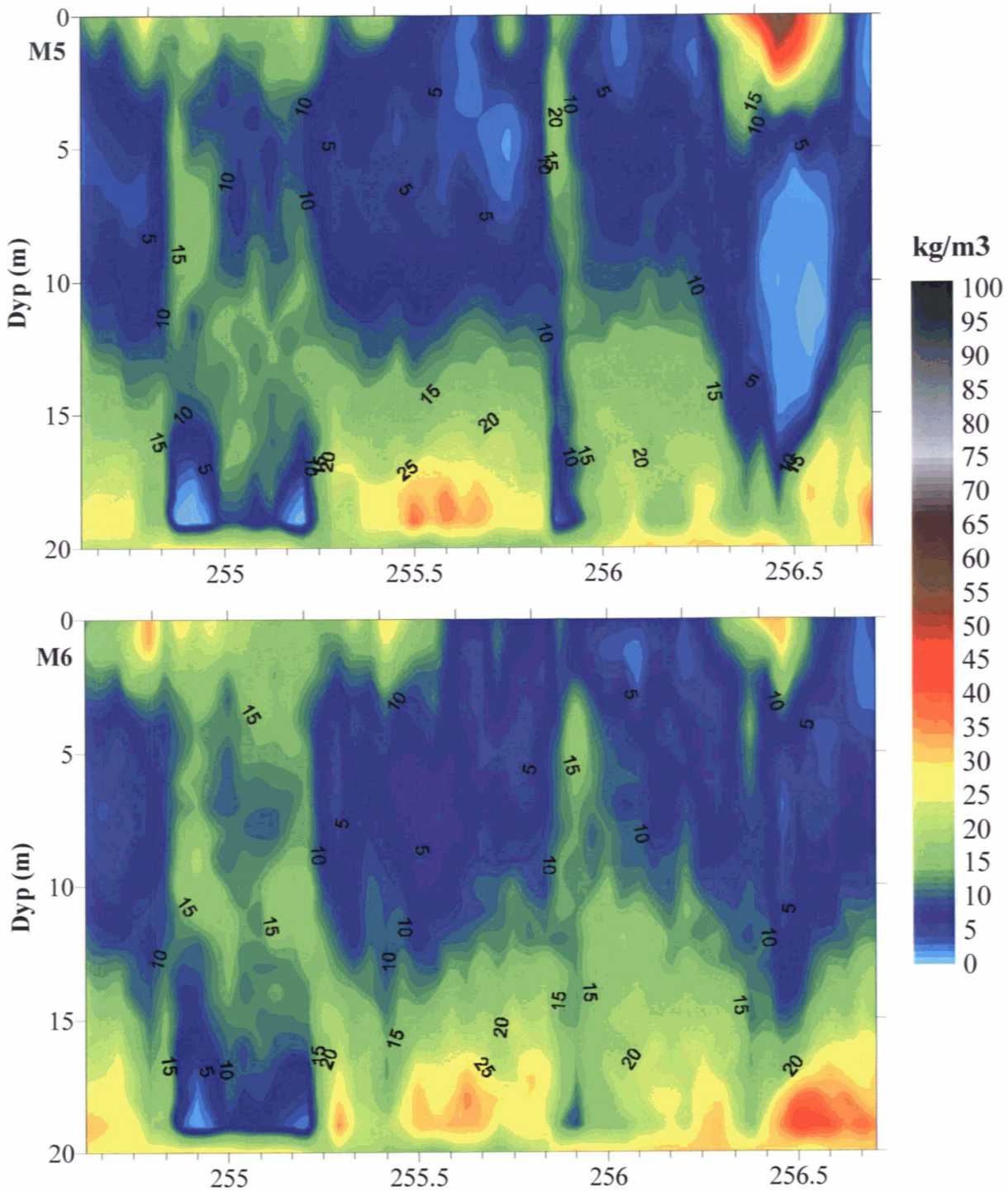
På denne lokaliteten var det en relativ stabil NV strømretning (306 grader) i hele dypet, det vil si på tvers av anlegget og dermed ut fjorden (Figur 4.4.4 og 4.4.5). Strømhastighetene varierte mellom 0.04 og 0.24 m/s. Strømmålingene nær anlegget var kraftig dempet hhv 62% og 77% for utsiden og innsiden og ingen tydelig hovedstrømretning. Det var intet tidevannsignal på noen av målerne nær anlegget, og middelhastigheten var på begge steder tilnærmet null. For innsiden ble det registret en relativ kraftig vertikal strøm dypere enn 17 m med hastigheter opp til 0.12 m/s (Appendiks). For de to andre målepunktene ble det ikke registrert høyere vertikalhastigheter enn 0.04 m/s. Som vist i Figur 4.4.5a omfattet observasjonsperioden fire halvdaglige tidevannssykluser. Figur 4.4.5.b viser strømhastighetene og Figur 4.4.5.c viser vannstrømmens retning målt i referansepunktet Figuren viser imidlertid periodiske tidevannsvariasjoner i strømhastighet. Det var relativt lite variasjon i strømhastighet med dyp, men de høyeste strømhastighetene ble målt på ca 10 m dyp.

Den totale tilførselen av oksygen per time i referansepunktet (Figur 4.4.5.a) viser en periodisk svingning med fire "topper" som kan skyldes tidevann. På inn- og utsiden er det en betydelig lavere oksygenfluks som i perioder ligger i nærheten av null. I teorien er oksygenmetning i merdene i hovedsak et resultat av konsentrasjonen i fri sjø (referansepunkt), vannstrømmen og fiskens forbruk. I fri sjø (referansepunkt) var metningen av oksygen relativt stabil og homogen med dyp (98,6 ± 2,7 %). Generelt var det høyest metning nær overflaten og det ble i perioder registrert "skyer" med lavere oksygenmetning i deler av vannsøylen. I forsøkmerdene var oksygenmetningen gjennomsnittlig ca 13 % lavere og viste en betydelig større variasjon (85,7 ± 5,8 %) enn i fri sjø. Som vist i Figur 4.4.6 b og c var det en gradvis reduksjon av oksygenmetning i løpet av perioden med enkeltmålinger ned mot 60 % metning nær overflaten. Svingningene synes i noen grad å kunne forklares av variasjon i vannstrøm. Perioden med lavest oksygenverdi er imidlertid vanskelig å forklare. For det første sammenfalt denne perioden med den høyeste strømhastigheten som ble målt i referansepunktet, samtidig som fisketettheten nær overflaten ikke var spesielt høy. En mulig forklaring kan være at ved høye strømhastigheter setter anlegget og den store biomassen opp en bakevje som igjen reduserer vannutskiftningen. Den lave og til dels avbøyde

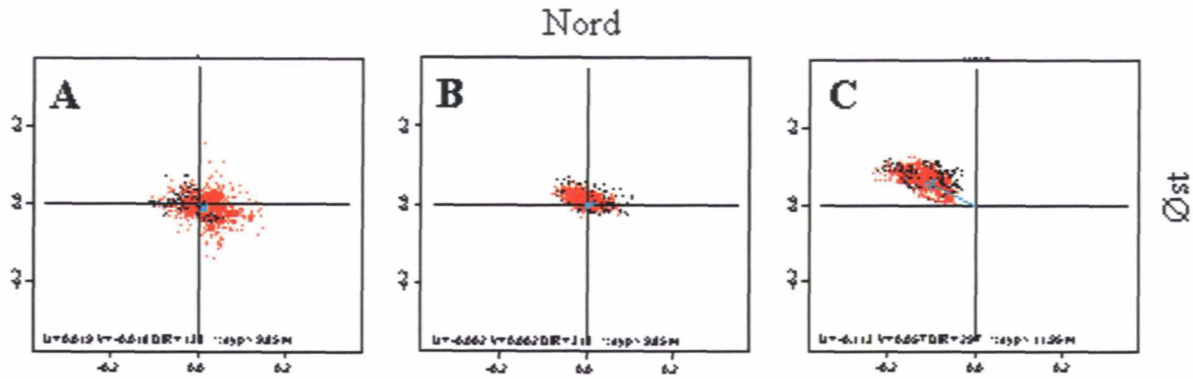
vannstrømmen kan tyde på dette. En mulig forklaring på at oksygenmetningen er lavest i overflaten kan være at fisken, som står med høyest tetthet dypt i merden, setter opp en vertikal strøm hvor de pumper 'brukt' og oksygenfattig vann mot overflaten og ut til sidene. En slik forklaring støttes av at det i denne perioden ble målt motsatt strømretning på hver side av anlegget (Appendiks).



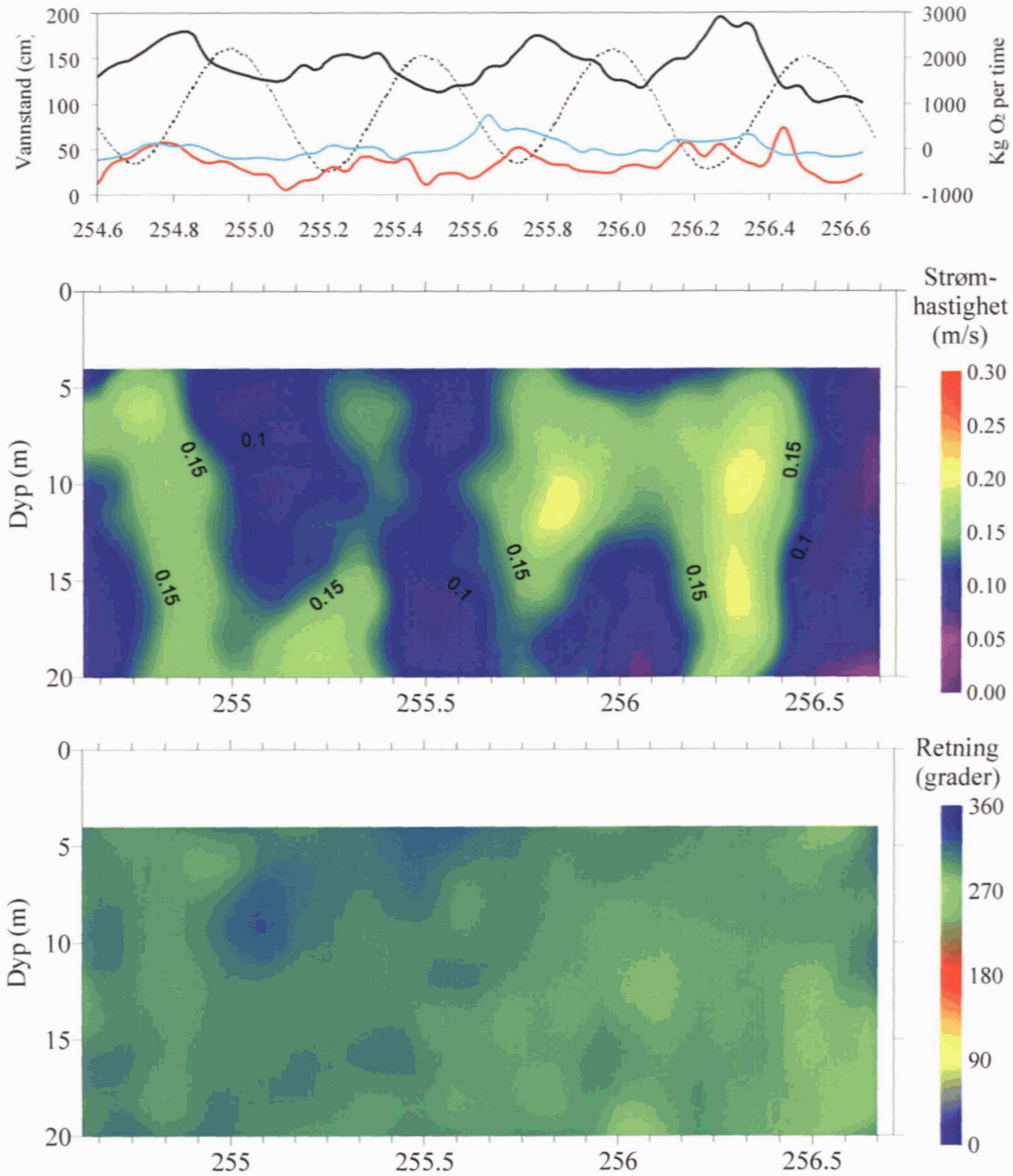
Figur 4.4.2a-c. Lokalitet 4 - "Fjord". Temperatur (°C), saltholdighet og lys (fotosyntetisk aktiv stråling (PAR) i $\mu E\ m^{-2}s^{-1}$) med den respektive fargeskalaen som viser verdi. Parametrene er registrert gjennom 50 timer i referansepunktet og y-aksen viser 0 til 20 meters dyp. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



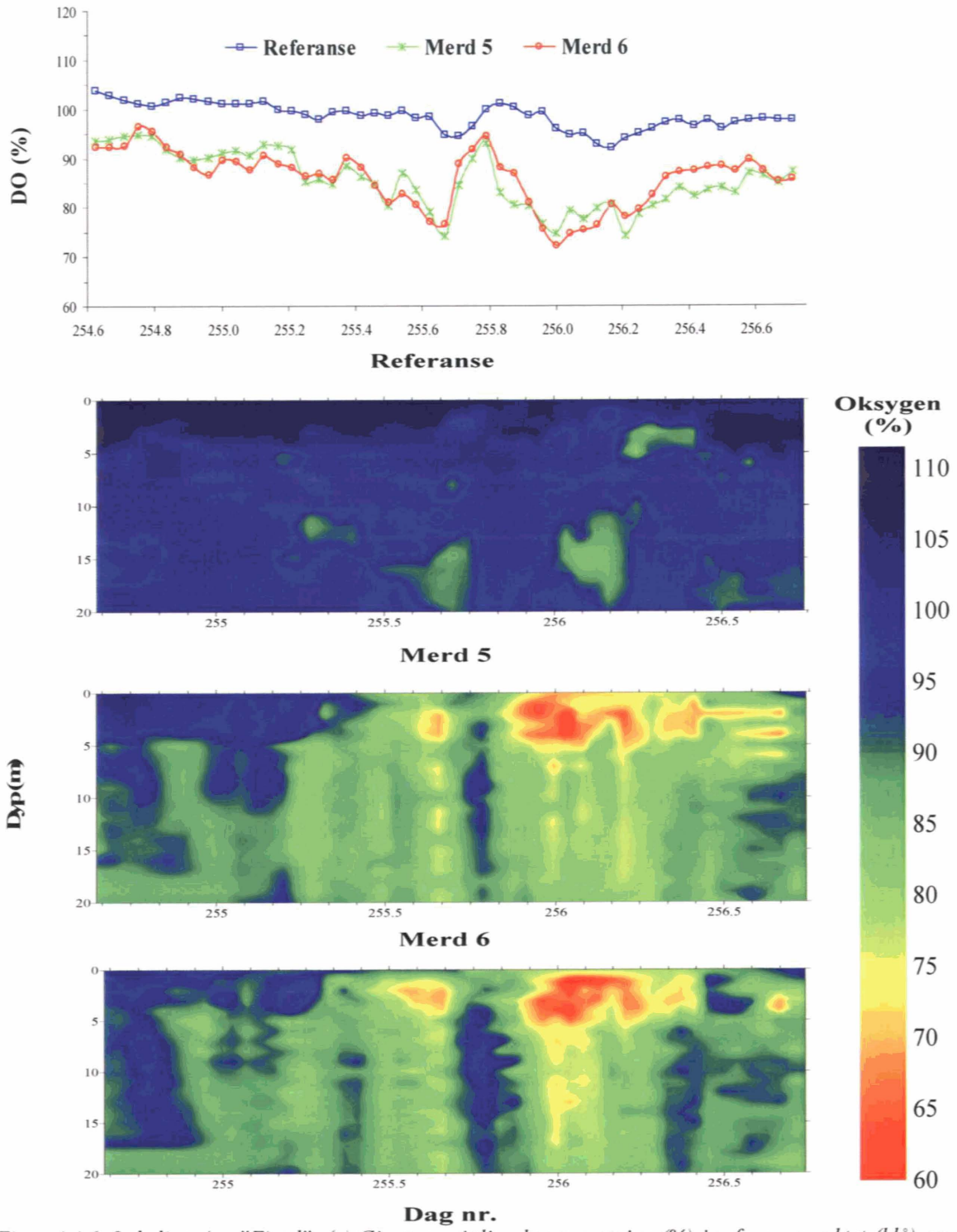
Figur 4.4.3. Lokalitet 4 "Fjord". Observert fisketetthet i forsøkskmerdene gjennom en 50 timers periode. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



Figur 4.4.4. Midlere strøm i 0-20 m dyp på Lokalitet 4. A er innsiden (inn), B er utsiden (ut) og C er referansepunktet. Hvert punkt representerer hastigheten midlet over 1 m og 1 time. Svarte og røde punkter er for posisjoner henholdsvis grunnere og dypere enn ca 10 m. Den blå pila indikerer midlere (over tid og dyp) hastighet og retning.



Figur 4.4.5. Lokalitet 4 – "Fjord". (a) Tidevannssyklus (m) for Bergen (stiplet linje) og beregnet oksygenfluks (kg O_2 per time) gjennom arealet av en merdvegg i referansepunktet (svart heltrukket linje) og på innsiden (rød) og utsiden (blå) av merdanlegget. (b) Strømhastighet i referansepunktet. (c) Strømretning i referansepunktet. Merk at målingene begynner på 4 m dyp. Heltall på x-aksen viser midnatt, mens 0,5 er middag.



Figur 4.4.6. Lokalitet 4 – "Fjord". (a) Gjennomsnittlig oksygenmetning (%) i referansepunktet (blå) og de to forsøks merdene (rød og grønn) gjennom en 50 timers observasjonsperiode. Variasjon med dyp er vist for referansepunktet (b) og forsøksmerdene (c og d)

5. Diskusjon

Målet med denne undersøkelsen var å gi detaljerte øyeblikksbilder av variasjonen i fysiske og biologiske og kjemiske miljøfaktorer på typiske kyst- og fjordlokaliteter. Undersøkelsen fokuserte på siste del av produksjonssyklusen. Biomassen var relativt høy, men lå godt under (8.1- 15.9 kg /m^3) det som er tillatt ifølge den såkalte "Tetthetsregelen" som sier at biomassen ikke skal overstige 25 kg /m^3 reelt oppdrettsvolum. Oksygenmetningen og faktorer som antas å påvirke denne, særlig vannstrøm og fordeling av fisk, ble gitt spesielt fokus. Bildene som avtegner seg er komplekse og noen av observasjonene er vanskelig å forklare. Det som imidlertid kan slås fast er at det innenfor en 50 timers periode er observert:

- Store variasjoner i de fleste miljøfaktorer innenfor ett og samme anlegg både over dyp og tid.
- Hovedstrømretning og strømhastighet i referansepunktet på en lokalitet sier lite om det reelle strømbildet i merdene.
- Demping og avbøyning av strøm forårsaket av anlegget har store konsekvenser for oksygenmetningen i merdene.
- Det var stor variasjon i svømmedyp og observert fisketetthet.
- Ammoniakk og karbondioksid verdier var generelt lave og langt under grenseverdier.
- Større variasjon i miljøparametere på fjord- enn på kystlokaliteter forårsaket av vertikale gradienter i saltholdighet og større effekt av tidevann på oksygenfluks.

Tatt i betraktning at undersøkelsen ble gjennomført i løpet av kun 14 dager og innenfor en begrenset geografisk utstrekning illustrerer resultatene i hvor sterk grad lakseproduksjon i merder foregår på naturens premisser. En må derfor forvente at man kan ha stor variasjon i produksjonspotensial mellom ulike lokaliteter på samme tid og innefor en lokalitet over tid. Valg av lokalitet er derfor av stor betydning for merdmiljøet og dermed atferd, velferd, som igjen har konsekvenser for produksjonsparametere som vekst og forfaktor.

Effekt av temperatur på vekst og oksygenforbruk

Temperatur er en sterkt styrende faktor for produksjon gjennom dens direkte påvirkning på veksthastighet hos fisk. I denne undersøkelsen varierte gjennomsnitts temperaturen på de ulike anleggene fra ca 10 til 15 °C. Veksthastighet hos stor laks er ca 30 % lavere ved 10 °C enn ved 15 °C . Hvis det er tempertur sjiktninger i merden vil dette imidlertid kunne føre til at fisken velger å stå på en bestemt temperatur. For eksempel på lokalitet 1 og 2 sto fisken i det varmere vannet høyere i merden på dagtid. Om natten stod imidlertid mer av fisken i det kaldere vannet. Dette vil påvirke denne fiskens veksthastighet og kan være med på å forklare størrelsesforskjeller innenfor en merd.

Når fisken vokser fortere ved høyere temperatur har dette også en potensiell "bakside". Økt veksthastighet vil kreve et høyere oksygenforbruk (Brett, 1972, Davis, 1975). Samtidig vil økt temperatur redusere løseligheten av oksygen (Davis, 1975). Med andre ord er det minst tilgjengelig oksygen når behovet er størst. Ut fra eksperimentelle studier er det etablert formler hvor en kan beregne oksygenforbruket, og et eksempel på dette er fra Christiansen m. fl. (1990):

$$M=5{,}5\ W^{-0{,}2}\ \exp^{0{,}07T}$$

der M er mg O_2 kg^{-1} min^{-1}, W er fiskens vekt i gram og T temperatur. Denne formelen er basert på et gjennomsnittsforbruk på stor laksefisk i en oppdrettsituasjon (det vil si der fisken fôres mye og forbruker oksygen til fordøyelse). Ut fra denne formelen kan man for eksempel finne ut at ved 10 °C forbruker en 2 kilos laks 2,86 mg O_2 kg^{-1} min^{-1} og ved 15 °C 3,44 mg O_2 kg^{-1} min^{-1}, mens løseligheten av oksygen er henholdsvis 9.5 og 8.5 mg O_2 l^{-1}. Formelen viser også at etter som fisken vokser reduseres oksygenforbruket per kilo. Man kan altså beregne det teoretiske forbruket av oksygen i et merdanlegg basert på fiskens størrelse, biomasse og temperatur. For merdene som deltok i undersøkelsen varierte det midlere oksygenbehovet fra 16 til 43 O_2 kg^{-1} t^{-1} .

Generelt om vannsirkulasjon langs kyst og fjord

Vannstrømmen ved en bestemt lokalitet skyldes flere forskjellige strømkilder. Bidragene fra disse kildene varier i tid, og det observerte strømbildet er en kompleks sum av bidragene fra alle kildene. For å kunne si noe om styrkeforholdene mellom de enkelte kilder må man overvåke store områder over tid. I denne undersøkelsen har vi målt over en relativt kort tidsperiode. Hensikten var å se om variasjoner i strøm kunne kobles til variasjoner i målte faktorer inne i merden. For denne hensikten er en 50 timers måleperiode ofte nok, men for å si noe om kildene til den observerte strømmen er det alt for lite.

Meteorologiske forhold som vind og trykk er viktige bidragsytere til strømbildet i fjorder og kystnære områder. Likevel er det generelt enkelte strømkilder som skiller seg ut, og som er verdt å nevne spesielt. De viktigste kildene i en fjord er vind, ferskvannsavrenning, tidevann og innstrømning av kystvann. Ved kysten vil vind, tidevann og kyststrøm være de viktigste kildene.

Vinden drar på overflaten, og danner dermed en overflatestrøm. I overflaten går strømmen noe til høyre for vindretningen, og fortsetter høydedreiningen med dypet samtidig som den svekkes (en såkalt Ekman spiral). Dette krever en stabil vind over tid, og effekten kan nå ned til mellom 15 og 100 m avhengig av sjiktning og varighet. Den viktigste effekten er at hvis man ser hele dette laget over ett så vil transporten av vann gå 90 grader til høyre for vindretningen (Ekman transport). Det er denne effekten som om sommeren transporterer "det gode badevannet" ut fra kysten. Innaskjærs og i fjorder vil denne dreiningen ofte bli hindret av øyer og land.

Ferskvannsavrenningen i en fjord gir en overflatestrøm utover en fjord. På veien utover vil ferskvannet bli oppblandet med det saltere vannet under og danne ett brakkvann som igjen blir saltere dess lengre ut man kommer (mer oppblanding). Brakkvannsstrømmen vil da øke i volum. I Sognefjorden kan denne oppblandingen for eksempel bli opptil 20 ganger det opprinnelige ferskvannslaget. Denne saltvannsfluksen opp i det utgående overflatelaget vil føre til en dypere inngående kompensasjonsstrøm. Dette kalles estuarin sirkulasjon.

Tidevannet skyldes solens og månens tiltrekningskraft på vannet. I våre farvann vil det som regel være to tidevannsbølger hver dag (månens periode er 12.42 timer, solas periode er 24 timer). Tidevannsstrømmen virker i utgangspunktet jevnt i hele vannsøylen, men ved sjiktning i vannet kan det oppstå ett komplisert strømbilde mellom lagene.

Kyststrømmen er drevet av en kombinasjon av utstrømning av brakkvann fra Østersjøen og vindpåvirkningen langs kysten. I brede fjorder kan en gren av kyststrømmen trenge inn langs sørsiden av våre vestlandsfjorder påvirket jordrotasjonen (Corioliskraft), og følge fjorden med

land på sin høyre side. For at Corioliseffekten skal virke må en fjord på våre breddegrader være minst 2-4 km bred. Mengden av innstrømmet kystvann er i stor grad styrt av vinden.

I denne undersøkelsen blir det ikke lagt vekk på de enkelte kilder, med unntak av tidevannet som virker periodisk over vår korte tidsskala. Tidevannseffekten kan likevel maskeres av summen av påvirkningen fra de andre kildene.

Effekt av tidevann på vannutskiftning i merder
Biomassen i en merd har et varierende oksygenbehov avhengig av temperatur. Den er derfor avhengig av en kontinuerlig tilførsel nytt vann med oksygen. Før nye oppdrettslokaliteter godkjennes må det derfor dokumenteres at det er tilstrekkelig vannstrøm på lokaliteten. Tidevann kan være en viktig faktor for strømstyrken på en lokalitet. I denne undersøkelsen dekket vi 4 halvdaglige tidevannsykluser på hvert anlegg og tatt utgangspunkt i tidevannstabell for Bergen. Maksimal og minimal vannstand kan avvike opptil en time for den enkelte lokalitet. Generelt er tidevannsdelen av strømmen null ved maks/min vannstand og maksimal ved middel vannstand. Den observerte strømmen på en lokalitet er imidlertid sammensatt av flere faktorer (for eksempel vinddrevet strøm, kyststrøm, estuarin sirkulasjon) der tidevannsstrømmen helt kan maskeres.

Strømhastigheten i referansepunktet på Lokalitet 1 viser et en særlig klart tidevannsignal. Her var det også indikasjoner på at tidevannets vannstandsvariasjon påvirket både maksimal og minimal strømhastighet. Også på lokalitet 2 og 4 var det sykliske svingninger i strømhastighet som kunne relateres til tidevann, men ikke så klare som på lokalitet 1. På lokalitet 3 var det derimot lite som tydet på at tidevannet var en sentral faktor for strømhastighet. Dette var samtidig den lokaliteten med sterkest middelstrøm.

Effekt av demping og avbøyning av vannstrøm for oksygenforhold
Vannstrømmen i referansepunktet angir bare den potensielle vannutskiftingen. Strømmen vil kunne dempes og avbøyes gjennom et anlegg. Som vist i Tabell 5.1 indikerte strømmålingene i nærheten av anlegget at strømhastigheten ble kraftig dempet. Den prosentvise reduksjonen i strømhastighet varierte fra 41 - 62 % prosent på innsiden og fra 60-77 % på utsiden (lesiden) av anlegget. På lokalitet 2 indikerte strømmålingen på innsiden av anlegget at det var en økning i strømhastighet, noe som kan skyldes lokale forskjeller i strømbildet på denne lokaliteten. Den sterke reduksjonen i strømhastighet har dermed en direkte konsekvens på oksygenfluksen gjennom anlegget (Tabell 5.1). Effekten av tidevann som ble observert i referansepunktet på lokalitet 1, 2 og 4 var svakt eller fraværende i målepunktene nær anlegget.

Det teoretiske oksygenforbruket er beregnet på total biomasse, fiskestørrelse, og middeltemperatur. Tilgjengelig oksygen er basert på strømmålinger på utsiden og innsiden. I Tabell 5.1 kan man se at oksygenforbruket ikke overskred det tilgjengelige i noen av de undersøkte merdene. Tabellen angir middelverdier og det er stor variasjon. Som man ser av Figurene 4.1.6a 4.2.6a 4.3.6a 4.4.6a er det perioder hvor vannstrømmen ikke klarer å forsyne merdene med så mye oksygen som forbrukes. Hvis dette hadde vedvart over tid, ville situasjonen i anlegget blitt kritisk. I Merd 6 på lokalitet 4 er det liten forskjell mellom tilgjengelig og forbrukt oksygen noe som gir en meget liten sikkerhetsmargin her i forhold til de fleste av de andre merdene i undersøkelsen.

Tabell 5.1. *Midlere horisontal vannhastighet uavhengig av retning i referansepunktet, på inn- og utsiden av anlegget (se lokalitetsfigurer for plassering). Demping er beregnet som prosentvis reduksjon i vannstrøm i forhold til referansepunktet. Oksygenfluks er gjennomsnitt over hele perioden og beregnet fra oksygenverdier målt i referansepunktet og vannstrøm i hovedstrømretning målt i de tre punktene. Tilgjengelig oksygen for fisken er beregnet fra mengde oksygen over 60% metning av O_2-fluksen ved merden (innsiden og utsiden). Fiskens forbruk er basert på total biomasse i merden og middeltemperatur over alle dyp og hele perioden. Minimum og maksimum observert fisketetthet er gitt for hver forsøksmerd over perioden.*

	Lokalitet			
	1 - fjord	**2 - kyst**	**3 - kyst**	**4 – fjord**
Vannstrøm (cm/s)				
referansepunkt	14 ± 6	10 ± 5	22 ± 5	13 ± 4
innsiden	6 ± 5	11 ± 8	13 ± 6	5 ± 3
utsiden	4 ± 3	4 ± 4	6 ± 4	3 ± 2
Demping innsiden	57 %	-10 % *	41 %	62 %
Demping utsiden	71 %	60 %	73 %	77 %
O_2-fluks (kg O_2 time^{-1})				
referansepunkt	2186 ± 1102	1501 ± 684	3107 ± 709	1846 ± 466
innsiden	481 ± 397	1487 ± 374	1870 ± 569	383 ± 216
utsiden	362 ± 296	483 ± 423	716 ± 480	156 ± 134
O_2-fisk (kg O_2 time^{-1})	merd 3 / merd 4	merd 2 / merd 6	merd 3 / merd 4	merd 5 / merd 6
tilgjengelig	148 / 110	533 / 176	280 / 675	114 / 47
forbruk	27 / 25	19 / 16	43 / 43	30 / 32
Tetthet (kg m^{-3})	merd 3 / merd 4	merd 2 / merd 6	merd 3 / merd 4	merd 5 / merd 6
minimum	0/ 0,6	0/ 0	0/ 0	0,3/ 1,3
maksimum	78,0/ 60,2	30,3/ 37,4	53,4/ 51,0	55,9/ 42,8

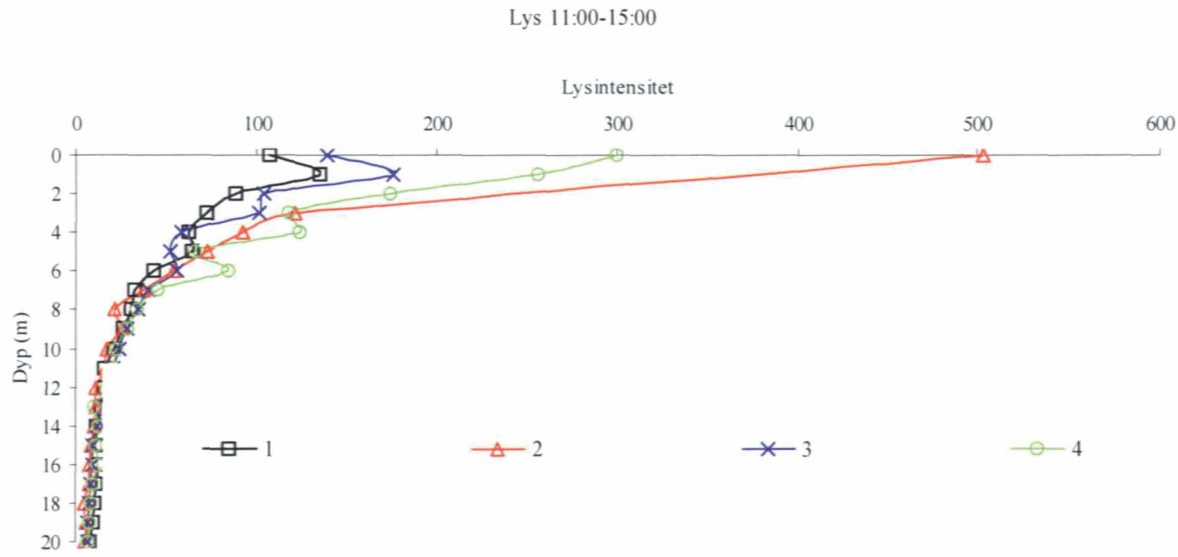
* negativ dempning betyr at strømmen var sterkere enn i referansepunktet.

Effekt av vertikale miljøgradienter og foring på svømmedyp og fisketetthet

At fisken ikke er jevnt fordelt i en merd vil bety at oksygenforbruket lokalt er større enn hvis fisken var jevnt fordelt. Hvis fisken for eksempel står med 5 ganger høyere tetthet i en del av merden vil dette kreve tilsvarende høyere oksygenfluks. Resultatene i denne undersøkelsen viser at et merdmiljø ikke er homogent, men har gradienter i en rekke miljøparametere. Miljøet varierer både i rom og tid.

Den miljøparameteren som kanskje har den sterkeste variasjonen er lysintensiteten. Lysintensiteten varierer med sesong, døgn og skydekke. Lys absorberes rask i sjøvann og det er derfor også en rask reduksjon i lysintensitet med dyp På dagtid kan lysintensiteten i overflaten være mange hundre ganger høyere i overflaten enn dypere i merden (Figur 5.1). På de fleste av de undersøkte anleggene var det en døgnvariasjon i svømmedyp og fisketetthet. Det var en klar sammenheng med lysendringen ved daggry og skumring som var bestemmende for endringen i atferd. Tidligere studier har vist at dette har sammenheng med endring i atferd mellom dag og natt (Fernö mfl. 1995, Juell 1995). Hvis en bruker kunstig lys vil dette påvirke døgnvariasjonen i atferd og hvor tett og dypt fisken står (Oppedal mfl. 2001, Juell mfl. 2003 a, b). Det er flere teorier om hvorfor fisken endrer atferd om natten. Fisken reduserer sin svømmeaktivitet og stimer mindre om natten og dette kan være et resultat av at fisken ikke ser så godt (Juell, 1995; Oppedal mfl. 2001). Tidligere studier har antydet at fiskens stimatferd på dagtid er en tilpasning for å unngå kollisjoner med andre fisk (Juell og

Westerberg, 1993; Juell, 1995). Når stimingen reduseres eller opphører om natten trenger fisken mer plass for å unngå konfrontasjoner og dette er kanskje årsaken til at fisken sprer seg mer ut om natten.



Figur 5.1. Gjennomsnittlig lysintensitet mellom kl 11 og 15 i ulike dyp i observasjonsperioden for Lokalitet 1-4.

Ved de fleste anleggene ser vi at fôring om dagen kontra natten gjør at fisken er mer i overflaten om dagen. Dette er i overensstemmelse med tidligere observasjoner i forsøk (Juell mfl.. 1994) og på kommersielle anlegg. Det er i tillegg vist at ikke bare fôring i seg selv trekker fisken mot overflaten, men også et høyt sultnivå (Juell mfl. 1994; Oppedal mfl.. 2001). Temperatursjiktninger kan ytterligere påvirke fiskens fordeling (Oppedal mfl.. 2001, Kristiansen mfl. 2003) og ved den mest utpregete fjordlokaliteten (1) og lokalitet 2 ble det observert fiskefordelinger som kunne tyde på en sammenheng mellom svømmedyp og unngåelse av det kaldeste vannet. På Lokalitet 4 var det indikasjoner på at fisken aktivt unngikk områder med lave oksygenverdier. Dette er tidligere ikke observert hos laks i sjøvann og er meget interessant å studere videre.

Effekter av lav oksygenmetning

Ved mangel på oksygen (hypoxi) stresses fisken og appetitten reduseres fordi fisken prøver å tilpasse seg det lave oksygennivået (Van Raaij m. fl. 1996). Man kan se at fisken ventilerer raskere og kraftigere med gjellene for å kompensere (Kramer, 1987). I en undersøkelse på regnbueørret fant man at fisken hadde to ulike atferdsresponser ved hypoksi. Enten økte de sin aktivitet for komme vekk fra de dårlige forholdene eller så la de seg helt i ro for å minimere O_2 forbruket til forholdene ble bedre (Van Raaij mfl.. 1996). En annen atferdsrespons kan være at fisken går opp til overflaten der det er mer oksygenrikt vann (Kramer, 1987). Fysiologisk har man også målt primære stress responser som følge av hypoksi som for eksempel forhøyet konsentrasjon av stresshormonene katekolaminer (A, NA) og kortisol, samt forandret osmotisk balanse og økt laktat nivå (Borch mfl.. 1993, Bindon mfl.. 1994, Gilmour 2001, Ellis mfl.. 2002). Sekundære stressresponser som redusert appetitt (og dermed tilvekst) er påvist i eksperimentelle studier for en rekke arter (Pichavant mfl.. 2001). For laksefisk i sjøvann har man registrert redusert tilvekst når oksygennivået synker under 70-80% og 6-7 mg l^{-1} (Forsberg mfl.. 1996). To forklaringer har vært foreslått: (1) en økning av energikostnader forbundet med pusting som minker tilgjengelig energi for vekst (Kramer,

1987) og (2) et redusert forinntak som tillater fisken å spare energi og redusere oksygenforbruket (Brett, 1979; Kramer 1978).

I denne undersøkelsen har vi dokumentert at strømbildet rundt matfiskanlegg med en relativt høy biomasse er komplekst og at det er klare indikasjoner på at anleggene demper og avbøyer strømmen. I tilegg er fisken normalt sett ikke jevnt fordelt i merdene. Disse faktorene virker sammen til å kunne forårsake periodisk lave oksygenmetninger. Dette ble påvist på alle anleggene og indikerer at oksygenforbruket er høyere enn oksygenfluksen. Det pågår en diskusjon om hva som er kritisk lave O_2 verdier. Her kan det være fornuftig å nyansere noe:

1. Kritiske O_2 verdier som er så lave at de stresser fisken. Dette vil innebære verdier så lave at de påvirker fiskens atferd, immunforsvar og vekstpotensial, (dvs som reduserer fiskens evne til å fordøye fôr og dermed fisken appetitt).
2. Letale O_2 verdier dvs verdier så lave at fisken dør.

Kritiske og letale verdier er ikke statiske, men er blant annet avhengig av fiskens allmenne tilstand og størrelse. I tillegg kommer effekten av periodiske variasjoner i oksygennivået. Det er forsket relativt lite på effekten av slike variasjoner, men effekten av en periode med hypoksi har sannsynligvis også en kostnad i ettertid (stressrecovery). Dette betyr at man bør ha gode sikkerhetsmarginer i oksygentilgang for å unngå negative effekter på produksjon og fiskevelferd.

Betydning av lokalisering på fiskens velferd
Denne undersøkelsen illustrerer at en fra fiskens ståsted bør vurdere en oppdrettslokalitet ut fra forholdet mellom forventet O_2 forbruk ved maksimal biomasse i anlegget og oksygenfluks ved lave strømhastigheter. I tillegg bør lokalitetskarakteristika som styrken på temperaturgradient vurderes fordi det vil påvirke hva som er det "effektive" volumet tilgjengelig for fisken. For å kompensere for variasjon mellom lokaliteter ville man da få lokalitetsspesifikk maksimal biomasse (MTB), fôrenergi (MTF) eller areal (MTA). På en lokalitet som har periodisk lav vanngjennomstrømning og/eller sterke temperaturgradienter kan man kompensere dette ved å øke det areal/volum som skal til for å sikre nok oksygen eller man kan redusere den maksimale biomassen som produseres på lokaliteten. Sannsynligvis er dette kontroversielt og har så langt ikke vært et alternativ når det gjelder nye måter å regulere produksjon på. I stedet har likhetsprinsippet, økonomiske konsekvenser, andre brukerinteresser og en lokalitets bæreevne (MOM, bunnfaunaens bæreevne) blitt tillagt størst vekt i vurderingene. Hvis en skal ta fiskens velferd på alvor må oksygenfluksen gjennom anlegg også tas med.

Den kraftige dempningen av strømmen som ble observert i denne undersøkelsen stiller også spørsmål ved om ikke andre anleggstyper enn den "kompakte" (stålanlegg med parallelle merder) ville gitt en bedre oksygenfluks. Det arbeides også med ny teknologi for å kunne tilføre oksygen til merder i perioder med lavt oksygen. Videre vil justering av fôringsstrategi slik at oksygenforbruk står i forhold til oksygenfluks potensielt kunne bidra til en mer stabil oksygenmetning. I forbindelse med fôring har man i eksperimentelle studier vist at oksygenforbruket 2-3 dobles og fortsetter å øke i 6 – 18 timer etter fôring (Jobling M., 1992). Dette betyr at i perioder med lave oksygenverdier kan man ved å forandre eller stoppe fôringen helt for å hjelpe fisken igjennom perioder med lavt oksygennivå.

Konklusjon

Denne type detaljerte undersøkelser av merdmiljø har ikke vært utført tidligere. Etter vår mening viser resultatene at det er et stort behov for å øke kunnskapen om de forhold som bidrar til å skape variasjon i merdmiljø med de konsekvenser det har for fiskens velferd og effektiv produksjon. Dette er viktig både når det gjelder å utvikle lokalitets spesifikke modeller for produksjon og når det gjelder å utvikle ny merdteknologi og produksjonsstrategier som tar høyde for den naturlige variasjon i miljøparametere som lakseproduksjon i merder er prisgitt. Viktig fokus for videre forskning på dette området er:

1. Variasjon i merdmiljø med spesielt fokus på effekter av oksygenmetning på fiskens atferd, fysiologi og vekst
2. Hydrodynamikk rundt ulike typer merdsystemer med høy biomasse
3. Utvikling av modeller for produksjonsregulering basert på lokalitetens spesifikke oksygenfluks

6. Referanser

Anon. 2001. Produktivitetsovervåkning av norsk lakseproduksjon. Sluttrapport fra POL-prosjektet, 35s.

Anon. 2003. Om dyrehold og dyrevelferd. Stortingsmelding 12 (2003-2004).

Bindon, S.D., Gilmour, K.M., Fenwick, J.C. and Perry, S.F. 1994. The effects of branchial chloride cell proliferation on respiratory function in the rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. Journal of Experimental Biology 197:47-63

Bjordal, Å., Juell, J.E., Lindem, T. & Fernö, A. (1993). Hydroacoustic monitoring and feeding control in cage rearing of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). In: *Fish Farming Technology* (ed. by H. Reinertsen, L.A. Dahle, L. Jørgensen and K. Tvinnereim), pp. 203-208. Balkema, Rotterdam, Netherlands

Borch, K., Jensen, F.B. and Andersen, B.B. 1993. Cardiac activity, ventilation rate and acid-base regulation in rainbow trout exposed to hypoxia and combined hypoxia and hypercapnia. Fish Physiology and Biochemistry 12 (2): 101-110

Brett, J.R., 1972. The metabolic demand for oxygen in fish, particularly salmonids, and a comparison with other vertebrates. Respiration physiology 14:151-170

Christiansen, J.S., Jobling M. & Jørgensen E. 1990. Oksygen og vannbehov. Nye reviderte tabeller, Norsk fiskeoppdrett 15 (10): 28-29

Davis J.C. 1975. Minimal dissolved oxygen requirements of aquatic life with emphasis on Canadian species: a rewiew. Journal of the Fisheries Research Board of Canada 32(12):2295-2332

Ellis, T., North, B., Scott, A.P., Bromaget, N.R., Porter, M. and Gadd, D. 2002. The relationships between stocking density and welfare in farmed rainbow trout. Journal of fish biology 61:493-531

Fernö, A., Huse, I., Juell, J.E. & Bjordal, Å. (1995). Vertical distribution of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in net pens: trade-off between surface light avoidance and food attraction. *Aquaculture* **132**, 285-296.

Forsberg O.I. And Bergheim A. 1996. The impact of constant and fluctuating oxygen concentrations and two water consumption rates on post-smolt atlantic salmon production parameters. Aquacultural engineering 15 (5):327-347

Gilmour, K.M. 2001. The CO_2/pH ventilatory drive in fish. Comparative Biochemistry and Physiology 130:219-240

Jobling M. 1992, Energiomsetning og vekst. In ed, Døving K. & Reimers E., Fiskens fysiologi 258-276. John Grieg Forlag AS, Verbum, Stavanger. ISBN 82-533-0268-1

Juell J.E. and Westerberg H. 1993. An ultrasonic telemetric system for automatic positioning of individual fish used to track salmon (*Salmo salar* L.) in a sea cage. *Aquacultural Engineering* (12) 1-18.

Juell, J.E. (1995). The behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in relation to efficient cage rearing. *Reviews in Fish biology and Fisheries* **5**, 320-335.

Juell, J.E., Fernö, A., Furevik, D. & Huse, I., 1994. Influence of hunger level and food availability on the spatial distribution of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., in sea cages. *Aquaculture and Fisheries Management* **25**, 439-451.

Juell, J-E & Fosseidengen, J.E. (2003) Use of artificial light to control swimming depth and fish density of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in production cages. *Aquaculture* (*In press*).

Juell, J-E, Oppedal, F, Boxaspen, K. & Taranger, G.L. 2003. Submerged light increases swimming depth and reduces fish density of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in production cages. *Aquaculture Research.* 34 , 469-477.

KPMG (2003) . Konsekvenser av ulike avgrensninger på konsesjonsnivå (MTA, MTB, MTF). KPMG Senter for fiskeri og havbruk.

Kramer D.L., 1987. Dissolved oxygen and fish behavior. Environmental Biology of Fishes. 18 (2):81-92

Kristiansen, T, Juell J. E. og Oppedal, F. 2003 Velferd og trivsel hos oppdrettsfisk. Havforskningstema nr 2 2003

Oppedal, F., Juell, J.E, Taranger, G.L. & Hansen, T. (2001). Artificial light and season affect vertical distribution and swimming behaviour of post-smolt Atlantic salmon in sea cages. *Journal of Fish Biology* **58**, 1570-1584.

Pichavant K., Person-Le-Ruyet J., Le Bayon N., Severe A., Le Roux A. And Boeuf G. 2001. Comparative effects of long-term hypoxia on growth, feeding and oxygen consumption in juvenile turbot and European sea bass. Journal of Fish Biology 59:875-883

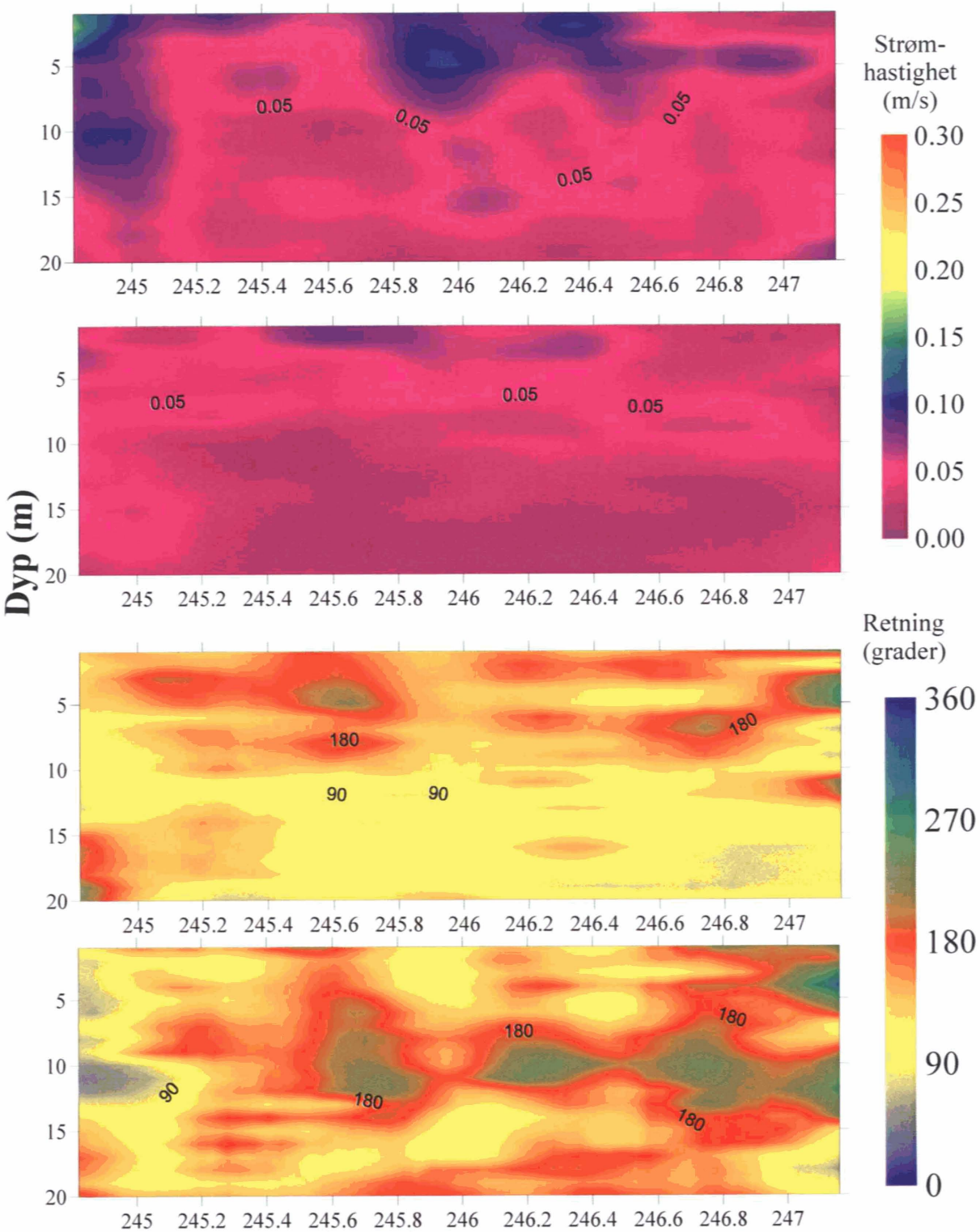
Treasurer, J.W., Hannah, F. and Cox, D., 2003. Impact of a phytoplankton bloom on mortalities and feeding response of farmed Atlantic salmon, *Salmo salar*, in west Scotland. Aquaculture 218:103-113

Van Raaij, M.T.M., Pit, D.S.S., Balm, P.H.M., Steffens, A.B. and van den Thillart, E.E.J.M. 1996. Behavioral startegy and the physiological stress response in rainbow trout exposed to severe hypoxia. Hormones and behavior 30:85-92

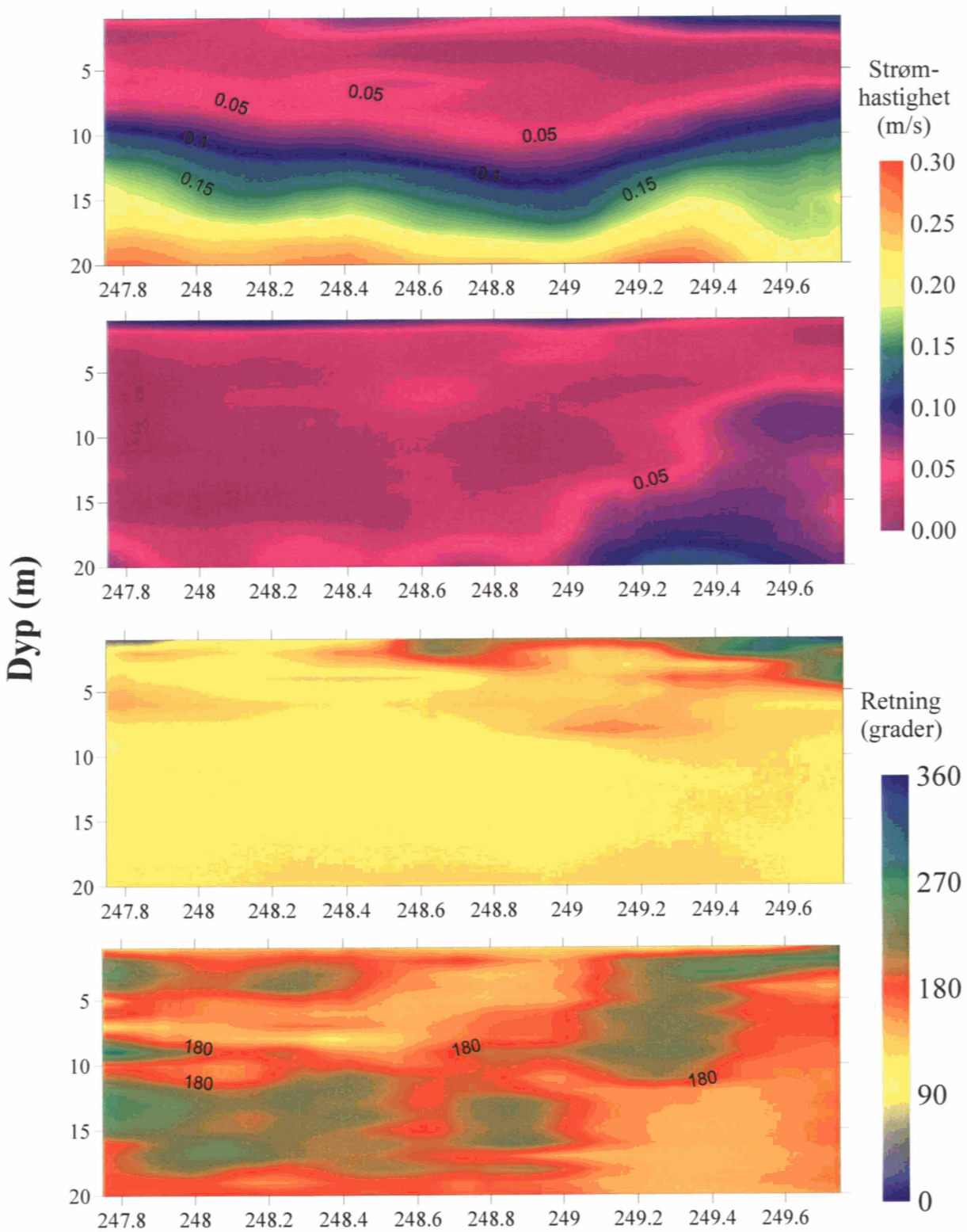
7. Appendiks

Dette appendikset gir utfyllende data for vannstrømmen på lokalitetene. Blant annet er vannstrøm dypere enn 20 m presentert. Disse dataene har kun indirekte betydning for analysen for de øvre 20 meterne som er presentert tidligere i rapporten. Vi har valgt å legge ved disse dypere dataene også, da det kan ha interesse for det enkelte anlegg å se hva som skjer lengre nede.

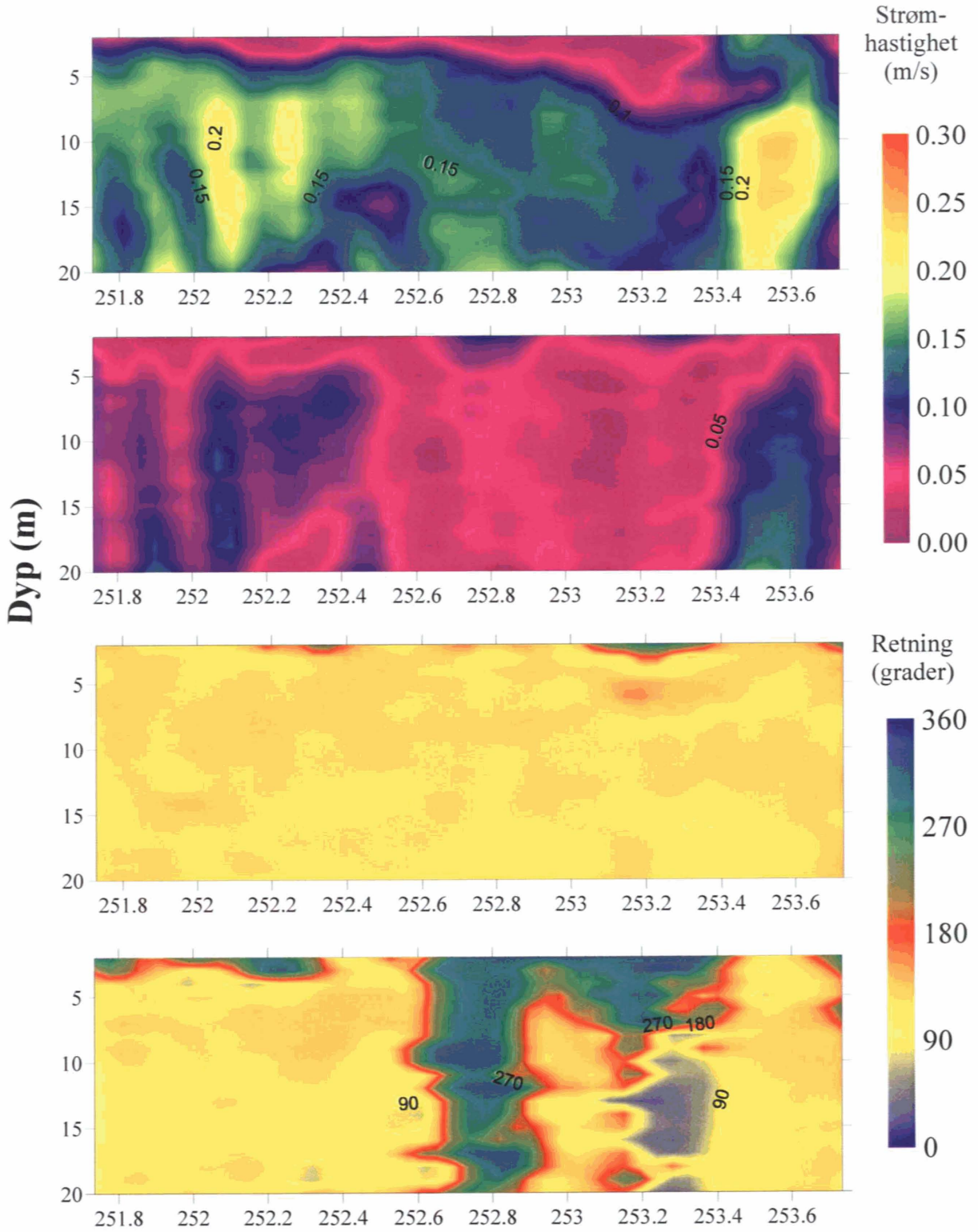
1. Strømhastighet og retning på innsiden og utsiden av anleggene (0-20 m dyp)
2. Tabell for totale vertikale og horisontale strømhastigheter i hele vannsøylen
3. Sammenligning av hovedstrømretning i hele vannsøylen på de 4 anleggene



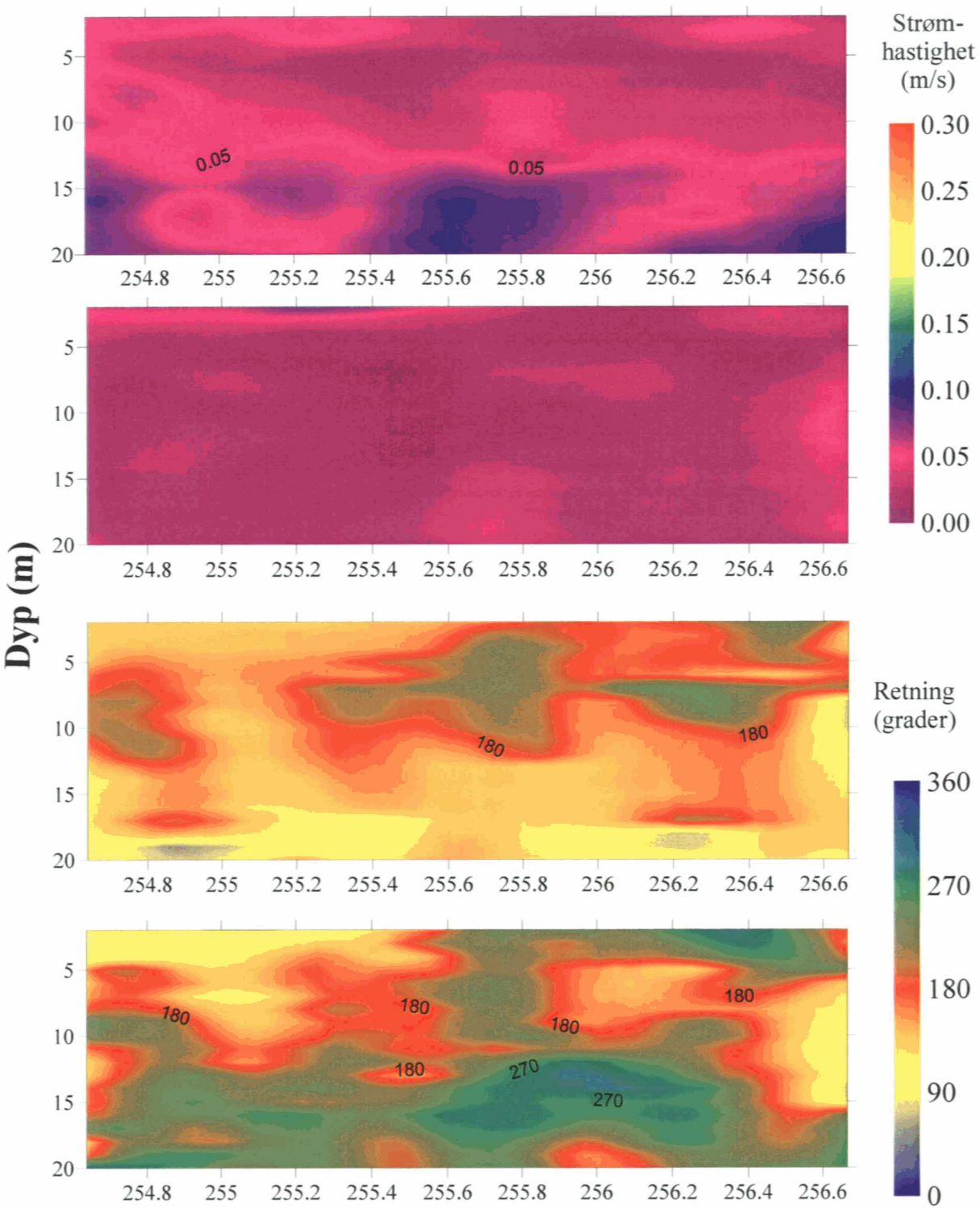
Lokalitet 1. *Total horisontal vannstrøm og retning på henholdsvis innsiden og utsiden.*



***Lokalitet 2**. Total horisontal vannstrøm og retning på henholdsvis innsiden og utsiden.*



***Lokalitet 3**. Total horisontal vannstrøm og retning på henholdsvis innsiden og utsiden.*



***Lokalitet 4**. Total horisontal vannstrøm og retning på henholdsvis innsiden og utsiden.*

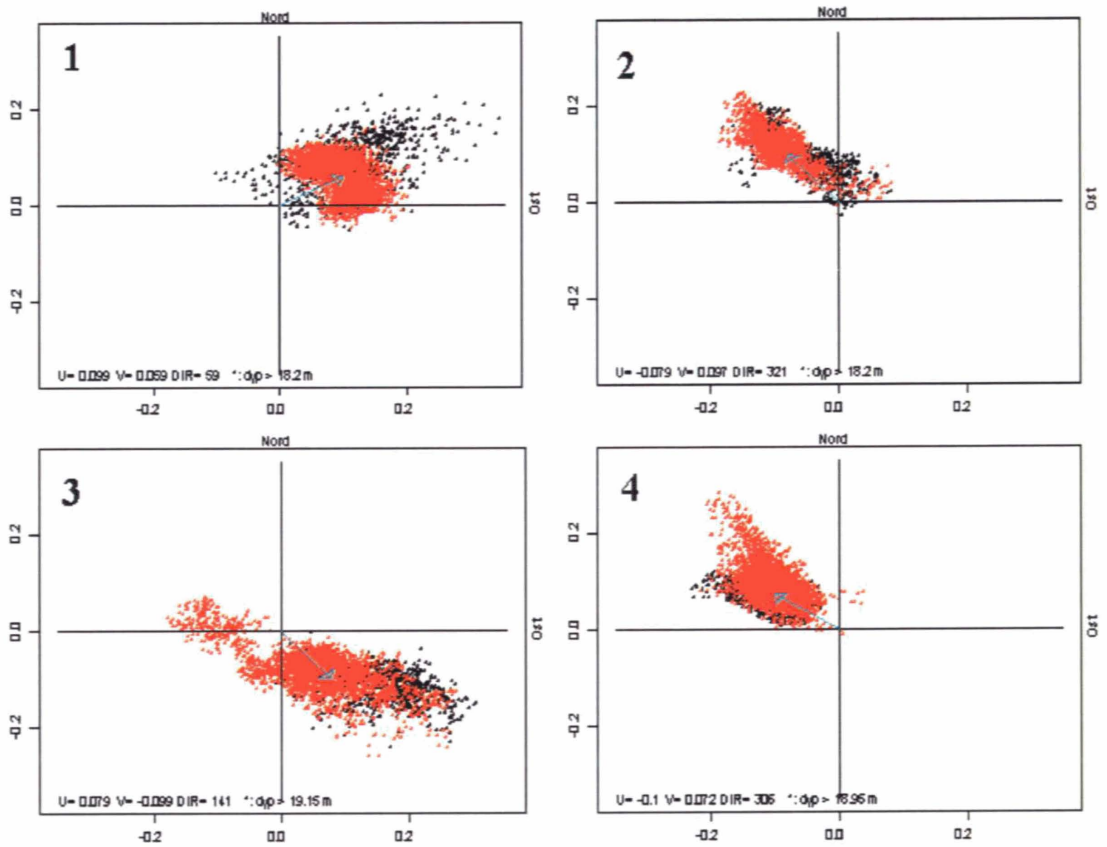
Tabell 7.1. *Middelhastigheter for den enkelte lokalitet i Referansepunktet. Middelhastigheten og standardavviket er regnet ut over hele perioden og alle dyp. Vh er horisontalhastigheten i hovedstrømretning, Dir er hovedstrømretning i grader der 0 er nord og videre med klokka, W er vertikalhastighet.*

	Dyp: 0-20 (m)		
	Vh (cm/s)	**Dir**	**W (cm/s**
Lokalitet 1	13.4 ± 7.8	57	3.8 ± 0.6
Lokalitet 2	9.1 ± 6.7	329	2.9 ± 0.6
Lokalitet 3	21.1 ± 6.9	127	3.3 ± 0.8
Lokalitet 4	12.7 ± 4.5	297	3.6 ± 0.5
	Dyp: 0- maks* (m)		
Lokalitet 1	11.5 ± 6.1	59	3.6 ± 0.7
Lokalitet 2	12.5 ± 5.8	321	3.1 ± 0.6
Lokalitet 3	12.7 ± 9.5	144	3.9 ± 0.8
Lokalitet 4	12.3 ± 4.4	306	3.7 ± 0.9

* maks er 70, 60 , 80 og 130 m for hhv lokalitet 1-4.

Sammenligning av hovedstrømretning i hele vannsøylen på de 4 anleggene

For alle lokalitetene var det overraskende stabile strømretninger. Dypere enn 20 m var strømstyrken tilnærmet lik på alle lokaliteter. Grunnere enn 20 m skiller kystlokalitetene seg noe ut med å ha både den kraftigste (lokalitet 3) og svakeste middelstrømmen (lokalitet 2). Tidevannsstrømmen ble observert på lokalitet 1, 2 og 4, men kunne ikke skilles ut på lokalitet 3. Generelt var tidevannsstrømmen maskert på enkelte dyp og perioder på alle lokaliteter. En annen oppsiktsvekkende likhet mellom lokalitetene er at vertikalhastigheten holder seg positiv (strøm oppover) gjennom hele måleperioden. Vi kjenner ikke til fenomener som skal kunne opprettholde en slik vertikal strøm over en såpass lang tidsperiode. Hvis dette er typisk over enda lengre tidsskala bør det undersøkes nærmere.



Midlere strøm i 0-max dyp i referansepunktet. Tallet i figurene identifiserer lokaliteten . Hvert punkt representerer hastigheten midlet over 1 m og 1 time. Svarte og røde punkter er for posisjoner henholdsvis grunnere og dypere enn ca 20 m. Den blå pila indikerer midlere (over tid og dyp) hastighet og retning.