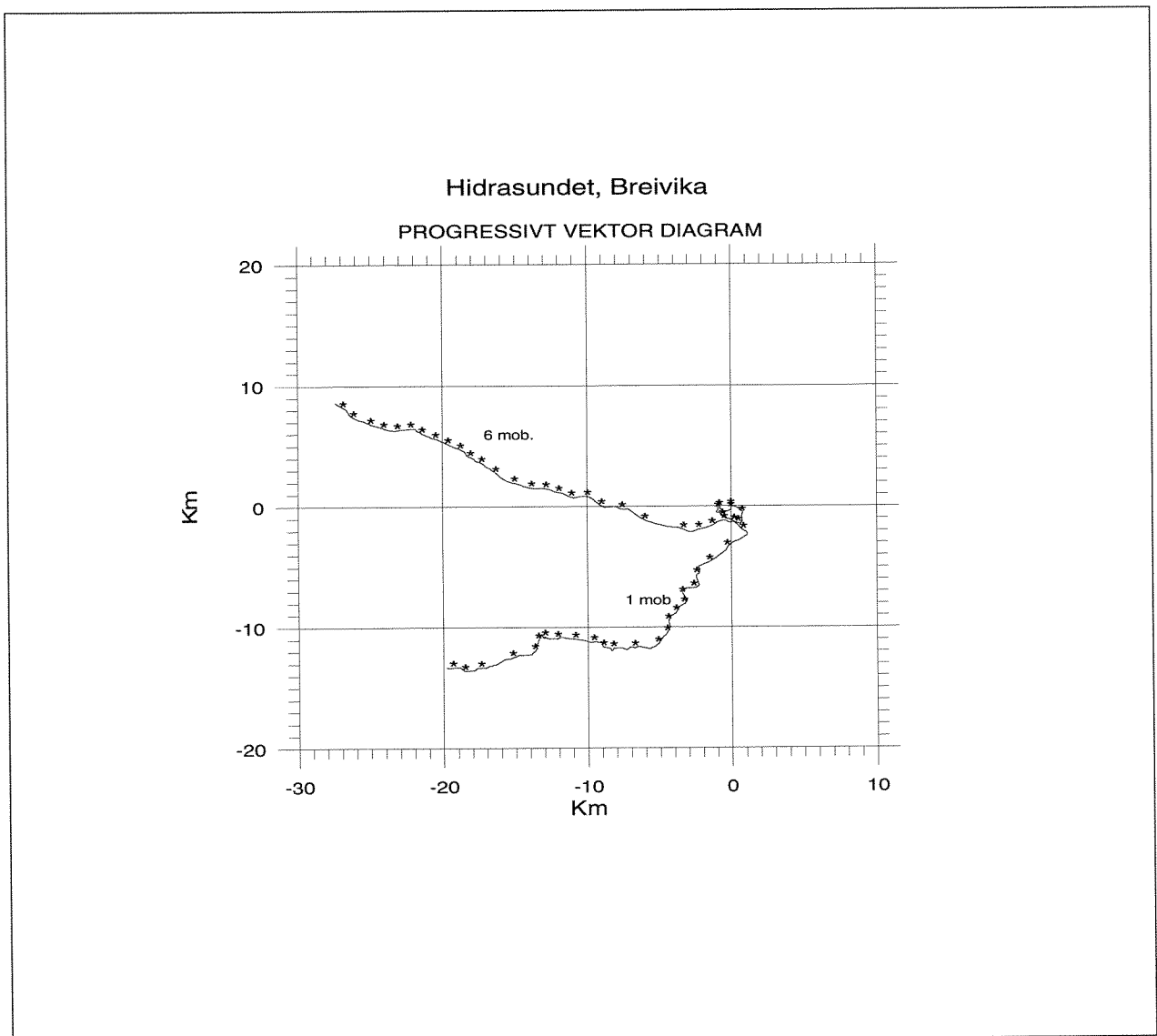


# Likestrømskabel mellom Sør-Norge og Kontinentet

Vannutskifting og forventet  
klorkonsentrasjon på lokaliteter  
for elektrodeanlegg



# NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Prosjektnr.:	Undernr.:
96050	
Løpenr.:	Begr. distrib.:
3485-96	Nei

<b>Hovedkontor</b>	<b>Sørlandsavdelingen</b>	<b>Østlandsavdelingen</b>	<b>Vestlandsavdelingen</b>	<b>Akvaplan-NIVA A/S</b>
Postboks 173, Kjelsås	Televeien 1	Rute 866	Nordnesboder 5	Søndre Tollbugate 3
0411 Oslo	4890 Grimstad	2312 Ottestad	5005 Bergen	9000 Tromsø
Telefon (47) 22 18 51 00	Telefon (47) 37 04 30 33	Telefon (47) 62 57 64 00	Telefon (47) 55 30 22 50	Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 22 18 52 00	Telefax (47) 37 04 45 13	Telefax (47) 62 57 66 53	Telefax (47) 55 30 22 51	Telefax (47) 77 68 05 09

Rapportens tittel:	Dato:	Trykket:
<b>Likestrømskabel mellom Sør-Norge og Kontinentet Vannutskifting og forventet klorkonsentrasjon på lokaliteter for elektrodeanlegg</b>	Mai/des.1996	Jan. 1997
	Faggruppe:	
	32	
Forfatter(e):	Geografisk område:	
<b>Lars G. Golmen Einar Nygaard</b>	Sørlandet, Norge	
	Antall sider:	Opplag:
	56	60 ex.

Oppdragsgiver:	Oppdragsg. ref.:
STATNETT, Postb. 5192 Maj, 0302 Oslo	CV/CN/10021, K. Faugstad

Ekstrakt: Rapporten omhandler beregninger av forventede klorkonsentrasjoner i sjøvannet ved 1.600 A likestrøms elektrodeanlegg som er tenkt plassert i Flekkefjord og Farsund kommuner. Lokalitetene er **Breivika** i Hidrasundet, østsiden av **Bugdøy** ved Farsund, og **Kaldvika** i Rosfjorden øst for Farsund. Ved 1.600 A og anodedrift kan det ved hvert anlegg bli produsert maksimalt 597 mg Cl<sub>2</sub>/sek som raskt omdannes til giftig hypokloritt og ufarlig klorid. NIVAs strømmålinger nær sjøbunnen på lokalitetene i mars-april 1996 viste middelerverdi for strømstyrke på mellom 1,2 og 2,5 cm/s. Sammen med teknisk og kjemisk informasjon er disse måleresultatene benyttet til å beregne forventede konsentrasjoner av reaksjonsprodukter av klor, som for det meste dreier seg om raskt nedbrytbart hypokloritt. Det konkluderes med at konsentrasjoner i verste fall kan overskride 0,01 mg/l klor like over og noen få meter nedstrøms elektrodeflatene. Forholdene når det gjelder vannutskiftingen på de tre lokalitetene er ganske lik, men Breivika bedømmes som den beste i så henseende.

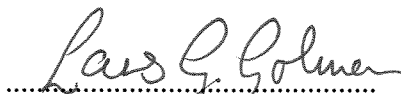
4 emneord, norske

1. Kabelanlegg
2. Elektroder
3. Strømforhold
4. Klor

4 emneord, engelske

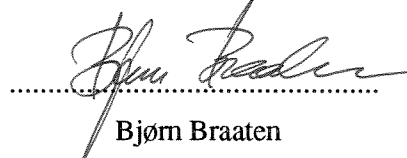
1. Cables
2. Electrodes
3. Currents
4. Chlorine

Prosjektleder



Lars G. Golmen

For administrasjonen



Bjørn Braaten

ISBN 82-577-3025-4

NIVA prosjektnr. 96050

# **Likestrømskabel mellom Sør-Norge og Kontinentet**

## **Vannutskifting og forventet klorkonsentrasjon på lokaliteter for elektrodeanlegg**

NIVA

10. mai/ 18. desember 1996

Lars G. Golmen  
Håvard Hovind  
Jarle Molvær  
Einar Nygaard

prosjektleder  
medarbeider  
medarbeider  
medarbeider

## **Forord**

*Gjennom kabelprosjektene Viking Cable, EuroKabel og NorNed Kabel planlegger STATNETT å etablere høyspent likestrøm kabelforbindelser fra Norge til Tyskland - Nederland. Elektrodeanlegg for returstrøm er planlagt plassert i Flekkefjord og Farsund kommuner. Det kan være aktuelt å plassere elektrodene på flere lokaliteter.*

*Når elektrodene anvendes som anoder vil det utvikles visse mengder klorgass. Mengdene vil avhenge av elektrisk strømstyrke og elektrodetype. Det har blitt reist spørsmål omkring hvor store klorkonsentrasjoner som faktisk kan oppstå rundt elektrodene, og hvor stort område som evt. kan bli påvirket av forhøyede konsentrasjoner. NIVAs oppdrag har hatt som målsetting å beregne forventede konsentrasjoner, basert på faktiske målinger av vannstrøm/vannutskifting på lokalitetene.*

*Prosjektet kom i gang i begynnelsen av februar 1996. I løpet av mars-april 1996 ble det bl.a. gjennomført målinger av vannstrøm på lokalitetene. Her var det behov for assistanse og koordinering fra mange parter. Følgende personer hos NIVA har bidratt vesentlig til å få prosjektet i havn: oseanografene Einar Nygaard og Jarle Molvær, laboratoriesjef Håvard Hovind, instrumentsjef Arne Veidel og sekretær Inger Midttun.*

*Leon Pedersen med M/S "Solvik" bistod med utplassering av strømmålere, og firma Far-Dykk v/ J. A. Nakkestad fra Farsund bistod med båt under opptak av målerne 18. april. Johan Abrahamsen, Farsund, og losbåten i Sokndal bistod velvilligst med tilsyn av målebøyene. Kirsten Faugstad har vært saksbehandler og kontaktperson hos STATNETT.*

*Lars G. Golmen  
prosjektleder*

# INNHold

<b>FORORD</b> .....	<b>3</b>
<b>FORKLARING TIL NOEN FAGUTTRYKK SOM ER BENYTTET I RAPPORTEN</b> .....	<b>6</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>8</b>
<b>1. INNLEDNING</b> .....	<b>10</b>
1.1. BAKGRUNN OG PROBLEMSTILLING .....	10
1.2. FORMÅLET MED NIVAS PROSJEKT .....	10
1.3. OMTALE AV LOKALITETENE .....	10
1.3.1. <i>Breivika i Hidrasundet</i> .....	10
1.3.2. <i>Bugdøy</i> .....	14
1.3.3. <i>Kaldvika i Rosfjorden</i> .....	15
1.4. KJEMISKE PROSESSER VED ELEKTRODEN.....	16
1.4.1. <i>Oksygen</i> .....	16
1.4.2. <i>Varme</i> .....	16
1.4.3. <i>Klor</i> .....	16
1.4.4. <i>Forventet klorproduksjon</i> .....	17
<b>2. MÅLEPROGRAMMET</b> .....	<b>18</b>
2.1. MÅLINGER AV VANNSTRØM .....	18
2.1.1. <i>Instrumenter</i> .....	18
2.1.2. <i>Strømrigger</i> .....	20
2.1.3. <i>Måleposisjoner</i> .....	20
2.1.4. <i>Måledyp</i> .....	22
2.1.5. <i>Måleperiode</i> .....	22
2.2. HYDROGRAFIMÅLINGER .....	22
2.2.1. <i>Instrumenter</i> .....	22
2.2.2. <i>Vannprøver</i> .....	23
2.3. BUNNPRØVER .....	23
<b>3. RESULTATER</b> .....	<b>25</b>
3.1. MÅLINGER AV VANNSTRØM .....	25
3.1.1. <i>Bugdøy</i> .....	25
3.1.2. <i>Kaldvika i Rosfjorden</i> .....	26
3.1.3. <i>Breivika i Hidrasundet</i> .....	26
3.2. FOREKOMST AV PERIODER MED SVAK VANNSTRØM.....	27
3.3. HYDROGRAFISKE PROFILER OG OKSYGEN.....	29
3.3.1. <i>Bugdøy</i> .....	29
3.3.2. <i>Kaldvika i Rosfjorden</i> .....	29
3.3.3. <i>Hidrasundet (Breivika)</i> .....	29
<b>4. DISKUSJON OG KONKLUSJON</b> .....	<b>30</b>
4.1. MÅLEDATA OG DATAREPRESENTATIVITET .....	30
4.2. TIDLIGERE MÅLTE ELLER BEREGNEDE KLORKONSENTRASJONER .....	30
4.2.1. <i>Grenseverdi for klorkonsentrasjon</i> .....	31
4.3. NYE BEREGNINGER FOR KLORKONSENTRASJON.....	31
4.3.1. <i>Faste inngangsverdier i modellen</i> .....	31

4.3.2. Inngangsverdier som er variert .....	32
4.3.3. Resultater.....	33
4.4. VURDERINGER.....	33
4.4.1. Plassering av anleggene .....	34
4.4.2. To anlegg på samme lokalitet .....	34
4.4.3. Rangering av lokalitetene .....	34
4.5. SLUTTKOMMENTARER OG KONKLUSJONER.....	35
4.5.1. Etterprøving.....	35
<b>5. LITTERATUR. ....</b>	<b>36</b>
<b>APPENDIKS 1.....</b>	<b>37</b>
<b>ENGLISH SUMMARY. ....</b>	<b>37</b>
<b>APPENDIKS 2, FIGURER AV MÅLERESULTATENE .....</b>	<b>39</b>

# Forklaring til noen faguttrykk som er benyttet i rapporten

<b>A:</b>	Ampere, enhet for elektrisk strømstyrke.
<b>Adveksjon:</b>	Begrep som er hyppig brukt om horisontal transport av vannmasser p.g.a. vannstrømmen.
<b>Anode:</b>	Negativ elektrode. Her: elektrode hvor elektrisk strøm sendes ut i sjøen.
<b>Diffusjon:</b>	Spredning av stoff fra område med høy konsentrasjon til område med lavere konsentrasjon.
<b>Elektrode:</b>	Utstyr for elektrisk strømovertgang til sjø.
<b>Elektrolyse:</b>	Elektro-kjemisk prosess i væsker som kan lede strøm (f.eks. sjøvann). Negative ioner som f.eks. kloridioner i sjøvann vandrer mot anoden, og positive ioner mot katoden.
<b>Fritt klor:</b>	Evt. fritt restklor. Omfatter elementært klor ( $\text{Cl}_2$ ), hypoklorsyre og hypokloritt.
<b>Influens-område:</b>	Betegnelse for et område rundt et utslipp til vann, jord eller luft der konsentrasjoner av forurensende stoff overskrider en gitt konsentrasjon eller verdi.
<b>Klor:</b>	Gass, benevnt $\text{Cl}_2$ , med irriterende lukt. Dannes ved elektrolyse av sjøvann.
<b>Klorid:</b>	Negativt ion ( $\text{Cl}^-$ ) som forekommer naturlig i store mengder i sjøvann.
<b>Kombinert klor:</b>	Evt. kombinert restklor. Omfatter klor bundet til ammoniakk eller aminoforbindelser og andre organiske forbindelser som inneholder klor i former som kan utveksles med andre forbindelser.
<b>Kummulativ fordeling:</b>	Statistisk måte å framstille måledata grafisk. X-aksen inndeles i intervaller, gjerne i forhold til max-min verdier i måleserien. For strømmålinger brukes dette ofte til å vise hvor stor prosent av samtlige målinger som ligger over gitte eller intervallgrenser.
<b>Oksidere:</b>	Kjemisk nedbryting eller omdanning av stoff ved forbruk av oksygen.
<b>Oppstrøms:</b>	Retningsbenevning. Angir retning fra en gjenstand mot strømrretningen.
<b>Nedstrøms:</b>	Retningsbenevning. Angir retning med strømmen fra en gjenstand.
<b>Resipient:</b>	Betegnelse på en geografisk lokalitet, f.eks. en fjord, som mottar forurensing.
<b>Rest-klor:</b>	Betegnelse på klor-produkter utenom klorid. Hypokloritt betegnes gjerne som fritt restklor.
<b>Salinitet:</b>	Enhet som angir mengden oppløste salter i sjøvannet. oppgis som kg salt pr kg sjøvann, og varierer typisk mellom 25 og 35 ("promille") langs norskekysten. Måles ved hjelp av sjøens ledningsevne (konduktivitet).
<b>Sjiktning:</b>	Vannsøylen i sjøen er oftest sjiktet eller lagdelt, ved at sjikt med lettere vann ligger over sjikt med tyngre vann. En sier da også at vannsøylen er stabil. Det lettere vannet kan gjerne være brakkvann som har lavere salinitet enn dypvannet.
<b>Totalklor:</b>	Evt. totalt restklor. Sum av fritt klor og kombinert klor.
<b>Vektormidlet strøm:</b>	Metode som gir en "typisk" verdi for vannstrømmen, når en tar omsyn til både retningen og styrken.





## SAMMENDRAG

Gjennom kabelprosjektene Viking Cable, EuroKabel og NorNed Kabel planlegger STATNETT å etablere 2 nye høyspent likestrøm kabelforbindelser fra Norge til Tyskland og 1 forbindelse til Nederland. Det skal legges én-leder isolerte kabler på bunn. Sjø/jord vil bli benyttet kontinuerlig eller i spesielle driftssituasjoner til returstrømmen. Ved hver landforbindelse anbringes elektroder i sjøen nær land. På norskekysten gjelder dette lokaliteter i kommunene Flekkefjord og Farsund.

Elektrodene vil enten tidvis eller kontinuerlig bli drevet som anoder. Ved slik drift vil det utvikles visse mengder klorgass fra sjøvannet på grunn av elektrolyse. Gassmengdene vil i første rekke avhenge av strømstyrke og elektrodetype. Det er aktuelt med en strømstyrke på maksimalt 1.600 A pr anlegg.

På norskekysten skal 2 eller 3 grafittelektroder anbringes. Det kan bli tale om å plassere to anlegg sammen, d.v.s. med samlet strømstyrke på 3.200 A. Hvert anlegg vil få et samlet elektrode-areal på om lag 400 m<sup>2</sup>, som fordeles ut over sjøbunnen over et areal på anslagsvis 100 x 200 m.

Det er tre aktuelle elektrodelokaliteter:

**Breivika** i Hidrasundet, Flekkefjord kommune,  
Østsida av **Bugdøy** ved Farsund, Farsund kommune,  
**Kaldvika** i Rosfjorden, øst for Farsund, Farsund kommune.

Når elektodene drives som anoder, vil det bl. a. produseres klorgass (Cl<sub>2</sub>) på grunn av elektrolyse av sjøvannet. Mengdene det er tale om ved den nevnte strømstyrken og elektrodetyper er maksimalt 600 mg Cl<sub>2</sub>/s pr anlegg ved anodedrift. Klorgassen eller reaksjonsproduktene mellom klor og sjøvann kan virke skadelig på marine organismer dersom konsentrasjonene organismene utsettes for, blir for høye.

STATNETT har derfor bedt NIVA om å utrede hvor høye konsentrasjoner av klor eller reaksjonsprodukter av klor som kan oppstå ved elektrodeanlegg når disse drives som anoder, og hvor stort influensområdet eller påvirkningsområdet eventuelt vil kunne bli. Grunnlaget for vurderingene er en konsentrasjon lik 0,01 mg/l klor som ved tidligere liknende utredninger er benyttet som en grenseverdi ved miljøvurderinger.

Det foreligger lite opplysninger i litteraturen om faktisk målte klorkonsentrasjoner i sjøen (saltvann), verken ved sjøanoder eller ved utslipp som for eksempel av klorert kjølevann. Utgangspunktet for beregningene har derfor vært eksisterende teoretiske utredninger for kjemiske prosesser ved elektrodeanlegg, samt nye målinger av vannstrøm og hydrografi på de tre lokalitetene som NIVA foretok i perioden 19. mars - 18. april 1996. I denne perioden ble det foretatt kontinuerlige målinger av vannstrøm med måleinstrumenter plassert 2 m og 6 m over bunn, samtidig på hver av de tre alternative lokalitetene. Måleintervallet for instrumentene var 10 minutter, slik at samlet antall målinger fra hvert instrument var om lag 4.500.

Tabellen på neste side viser noen statistiske måleresultater for vannstrøm. På alle lokalitetene var det svakest vannstrøm nærmest bunn. Middelverdien (middelverdi for alle målingene i måleperioden) for styrken av vannstrømmen for hver måleserie lå innenfor 1,2 - 2,5 cm/s, men det var i perioder vesentlig sterkere vannstrøm enn dette.

Dominerende retning for vannstrømmen var mot øst-sørøst ved Bugdøy, øst-nordøst i Kaldvika og vest-sørvest i Breivika. Vannstrømmen var relativt retningsstabil på alle lokalitetene. Det var lite innslag av vekslende tidevannsgenerert vannstrøm.

Måle-lokalitet	Måledyp (m.o.b.)	Middel strømstyrke (cm/s)	Dominerende strømretning (°), retn	% av målingene < 1,5 cm/s
<b>Bugdøy Ø.</b>	6	1,57	86 (E)	88
<b>Bugdøy Ø.</b>	2	1,38	155 (SE)	82
<b>Kaldvika</b>	6	2,46	91 (E)	35
<b>Kaldvika</b>	2	1,22	44 (NE)	92
<b>Breivika</b>	6	1,51	236 (SW)	78
<b>Breivika</b>	2	1,37	288 (W)	80

Basert på måleresultatene er det foretatt beregninger for forventede klorkonsentrasjoner over og nedstrøms elektroden. Beregningene baseres på utslipp av klor fra et "flatt" anlegg på bunnen til overliggende sjøvann. Vannstrømmen over elektroden transporterer og fortynner så klor og reaksjonsproduktene videre i et sjikt nær bunnen.

En sentral faktor i beregningene er hvor raskt reaksjonsproduktene av klor, i første rekke hypokloritt, nedbrytes eller omdannes i sjøvannet. Dette vil avhenge av bl.a. sjøens temperatur og konsentrasjon av oksiderbart organisk stoff i sjøvannet. Tallene i litteraturen for halveringstiden varierer en del, men ligger typisk mellom 10 og 30 minutter. For modellberegningene har vi valgt å benytte 20 minutter for halveringstid som en representativ eller realistisk verdi.

Resultatene av beregningene for realistiske verdier viser at verdien på 0,01 mg/l klor pr liter sjøvann kan overskrides i et 2-3 m tykt bunnsjikt inntil 5 m fra (nedstrøms) anlegget. Dette gir et teoretisk influensområde på 200 m x 5 m utenfor selve anlegget.

Disse beregningene er basert på relativt nøkterne anslag for verdier og prosesser som påvirker resultatene. Produksjonen av klor og reaksjonsprodukter av klor er en viktig faktor. Den vil ligge vesentlig under det oppgitte maksimum, blant annet fordi det også produseres oksygen i stedet for klor ved anodedrift. Det angitte resultatet for influensområde er basert på 50% av maksimal klorproduksjon.

# 1. INNLEDNING

## 1.1. Bakgrunn og problemstilling

STATNETT planlegger å etablere 2 nye kabelforbindelser fra Norge til Tyskland og 1 forbindelse til Nederland. Det legges en-leder isolerte kabler på bunn. Sjø/jord vil benyttes til returstrømmen. Ved hver landforbindelse anbringes elektroder i sjøen nær land. På norskekysten gjelder dette lokaliteter i kommunene Flekkefjord og Farsund.

Elektrodene vil enten tidvis eller kontinuerlig bli drevet som anoder. Ved slik drift vil det utvikles en del klorgass fra sjøvannet på grunn av elektrolyse. Gassmengdene vil i første rekke avhenge av elektrisk strømstyrke og elektrodetype. Det er tale om en strømstyrke på 1.600 A pr anlegg. På norskekysten skal 2 eller 3 grafittelektroder anbringes. Det kan være tale om å plassere to anlegg sammen. D.v.s. med samlet strømstyrke på 3.200 A.

Klorgassen vil bli oksydert, og det dannes hypokloritt;  $\text{OCl}^-$ . Videre dannes mindre mengder av bl.a. hypobromitt, kloroform, bromoform og halogenaminer som også er giftige forbindelser ved forhøyede konsentrasjoner. Det har blitt reist spørsmål omkring hvor høye konsentrasjoner av slike klorforbindelser som faktisk kan oppstå over og rundt elektrodene, og hvor stort område som evt. kan bli påvirket av forhøyede konsentrasjoner.

## 1.2. Formålet med NIVAs prosjekt

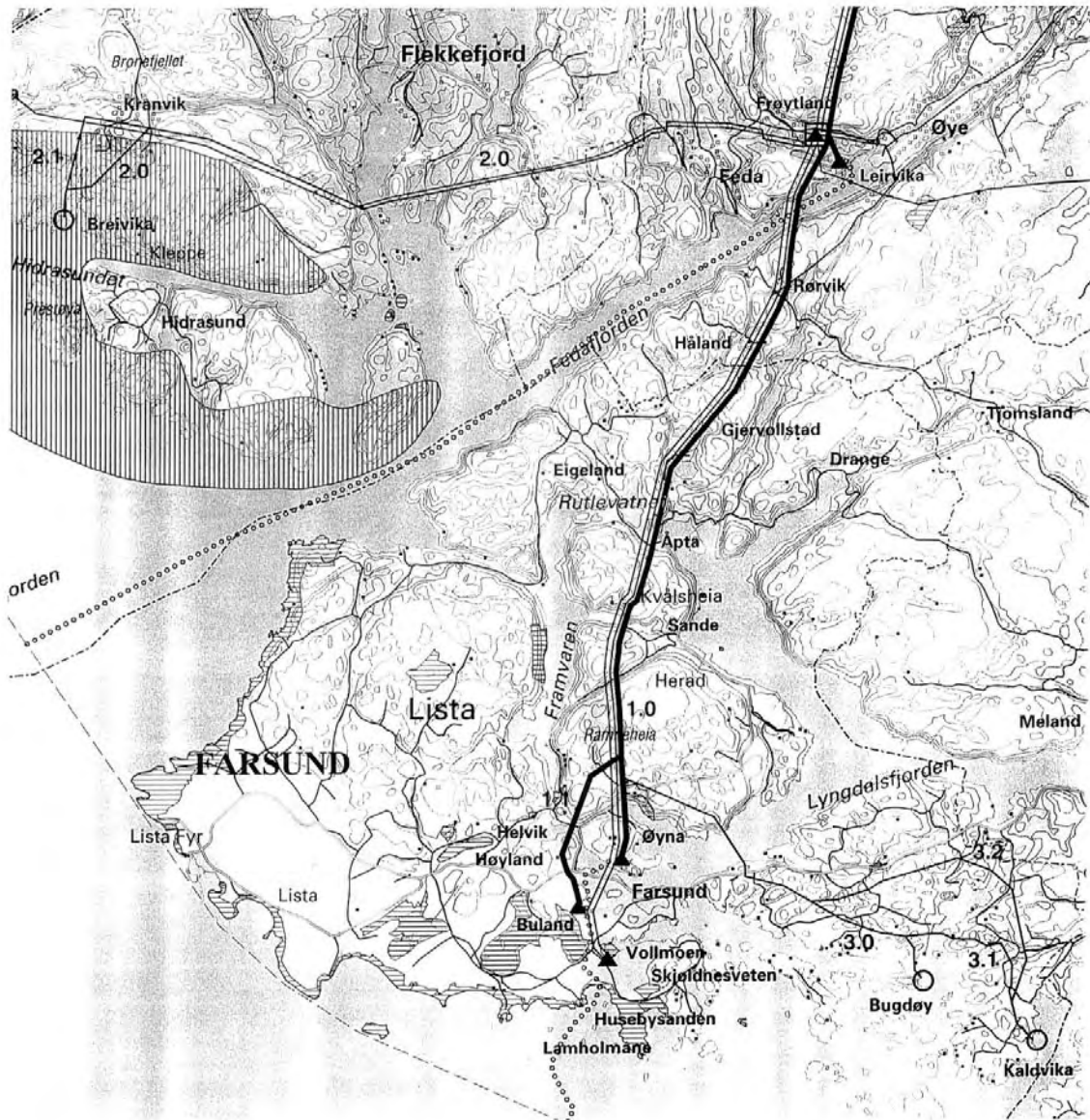
Mens produksjon av klor og restklor produkter for en gitt elektrodetype er bestemt av den elektriske strømstyrken, vil de faktiske konsentrasjonene over og nedstrøms elektroden være bestemt av bl.a. hvordan vannstrømmen er på stedet. I tidligere utredninger (Poleo og Harboe 1996, Koops 1996) er det kun gjort teoretiske anslag for forventede klorkonsentrasjoner, basert på nøkterne antakelser om stagnerende vannmasser ved bunn.

**Hovedformålet med denne utredningen er å framskaffe faktiske opplysninger om vannutskiftingen på de aktuelle elektrodelokalitetene, og derigjennom framskaffe nye beregninger for forventede klorkonsentrasjoner på og rundt elektrodene.**

## 1.3. Omtale av lokalitetene

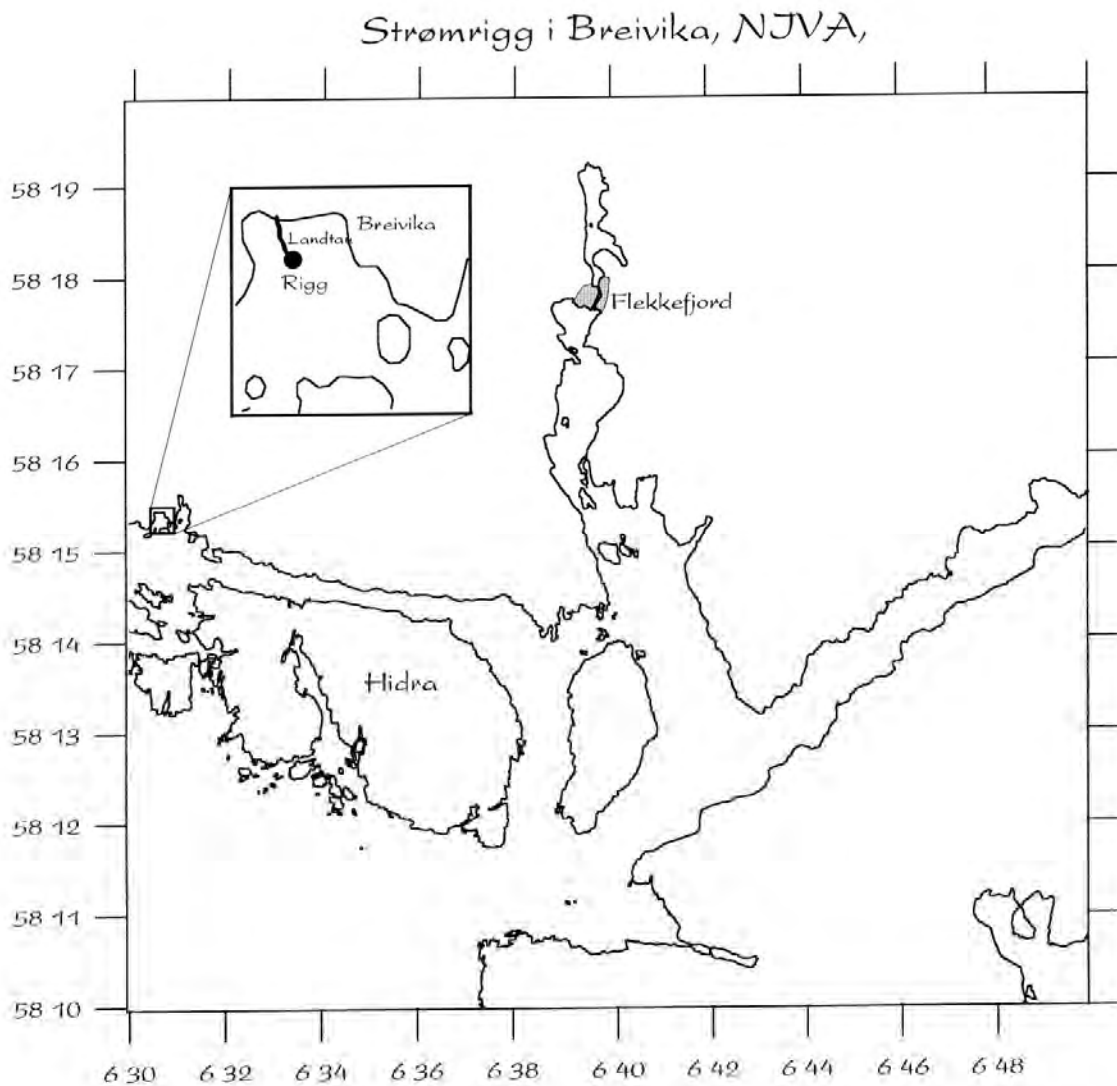
### 1.3.1. Breivika i Hidrasundet

Breivika ligger på fastlandssida i nordre del av Hidrasundet. Figur 1.1 viser utsnitt fra sjøkart nr 478, med fastlandssida nord for Breivika. Fig. 1.2 viser en enklere skisse av Breivika og området rundt, med inntegnet posisjon for strømmåler-rigg. Største dyp inne i vika er 48 m, i følge sjøkartet. Største dyp (seilingsdyp) på terskelen er om lag 30 m. Det er bratte berg eller stor-steinet strand langs mesteparten av vika. I munningen ligger tre større holmer, som skjermer for noe av bølgedraget vestafor.



**Figur 1.1.** Kart som viser de tre lokalitetene Bugdøy, Kaldvika og Breivika (øverst t.v.).

STATNETT hadde foretatt detalj-oppmålinger av sjøbunnen i Breivika før foreliggende prosjekt startet. Fig. 1.3 viser det koterte kartet basert på disse målingene. Det framgår at det dypeste partiet, d.v.s. med dybder større enn 42-43 m, er relativt flatt.



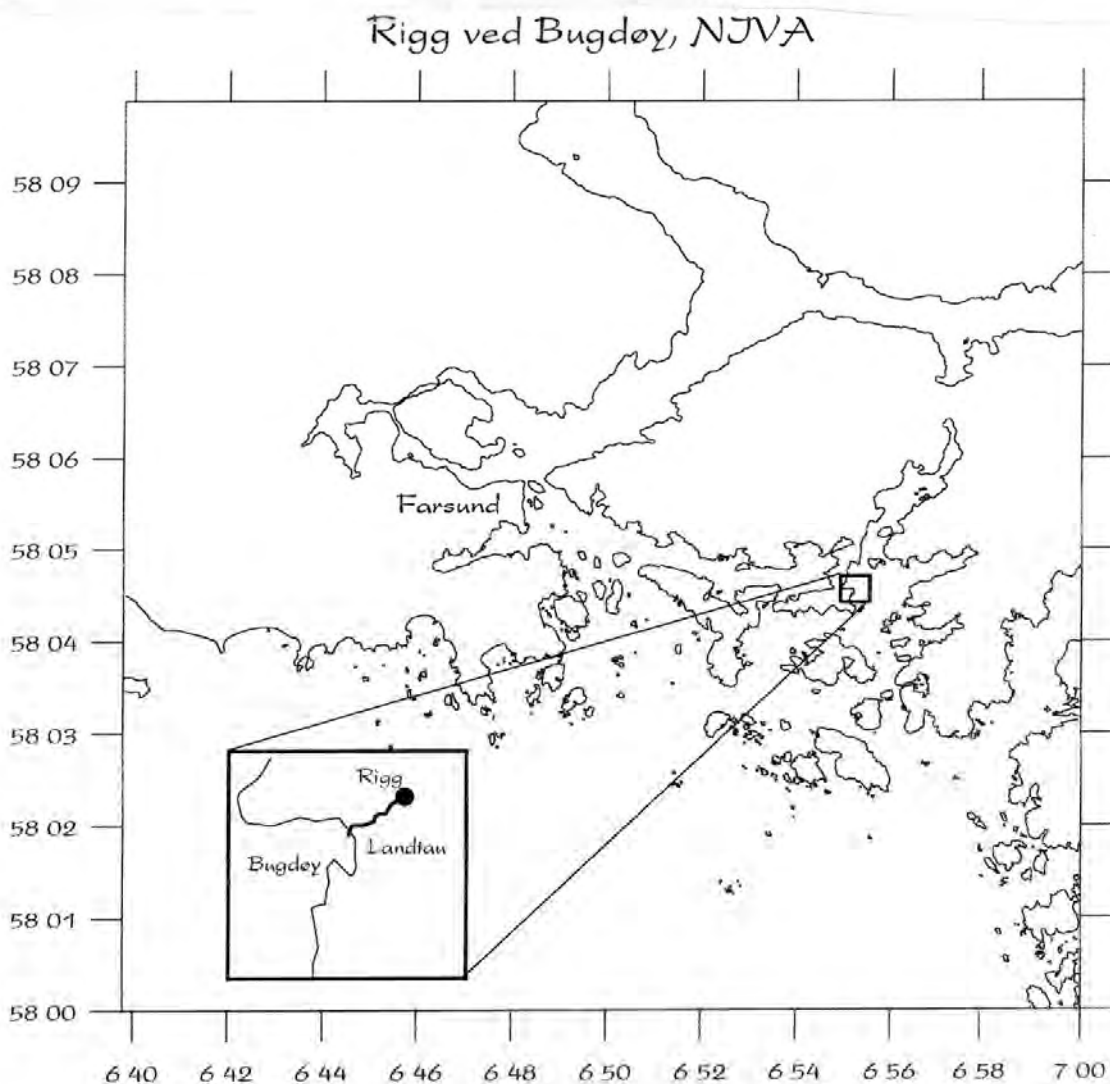
**Figur 1.2.** Kartskisse over lokalitet Breivika, med posisjonen for strømmåler-riggen markert. Aksene angir grader og minutter nord- og øst.



**Figur 1.3.** Kotert bunnkart for Breivika, basert på målinger utført av STATNETT.

### 1.3.2. Bugdøy

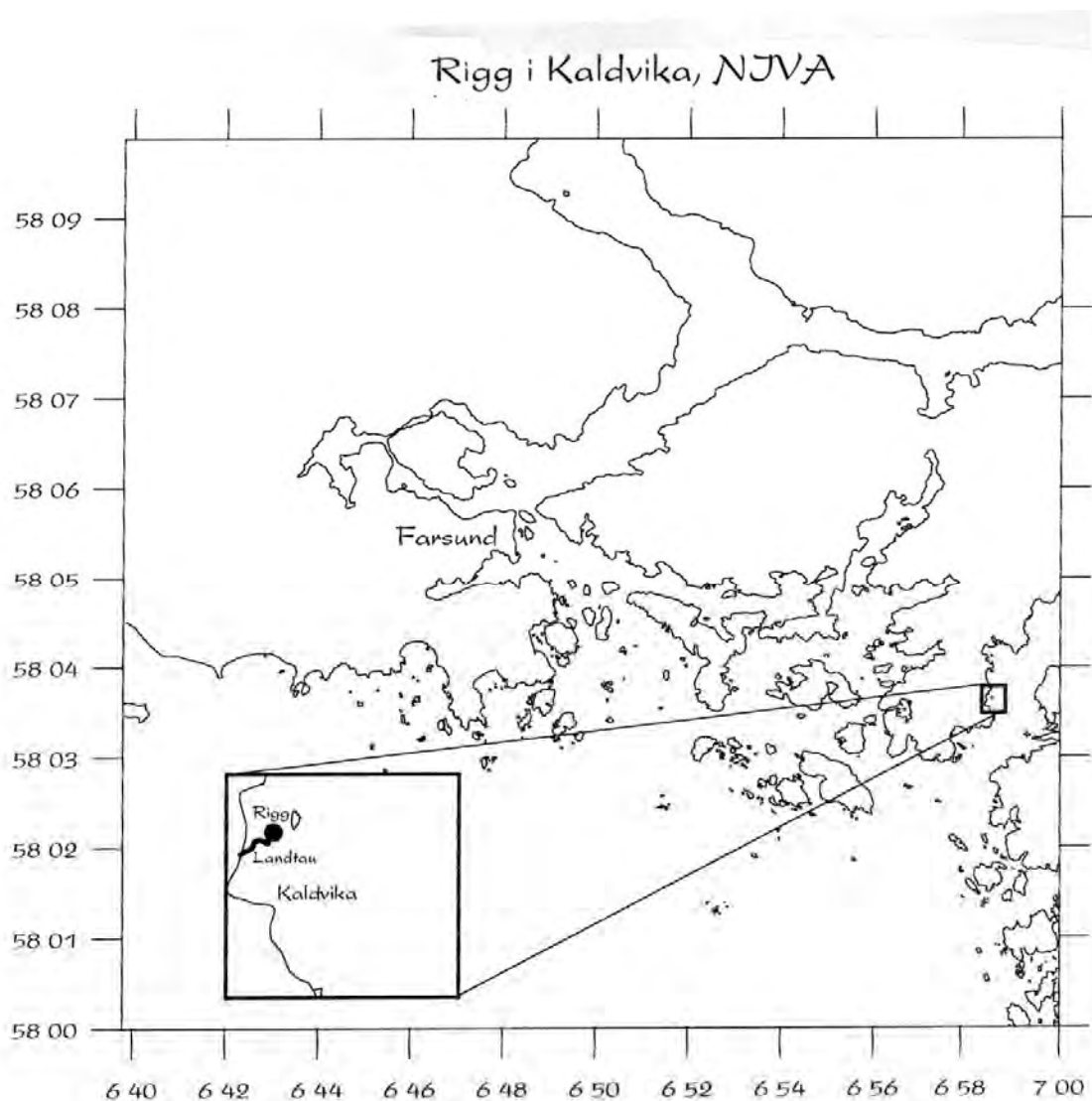
Fig. 1.1 viser et utsnitt av sjøkartet (sjøkart nr 11), som dekker elektrodelokaliteten på østsida av Bugdøy. Lokaliteten strekker seg nordøstover fra Kanonodden (odden som ligger rett N-NV for Austnes). Bunnen på lokaliteten skrår med helning rundt 1:2 fra land og østover til ca 50 m dyp. Deretter avtar helningsgraden til om lag 1:10 ut til maksimaldyp på rundt 75 m. Fig. 1.4 viser en kartskisse av lokaliteten, og dens beliggenhet i forhold til Farsund by. Posisjon for måling av vannstrøm er også markert. Lokaliteten er relativt skjermet i forhold til vind, slik at det ikke oppstår særlig høye bølger.



**Figur 1.4.** Kartskisse over lokalitet Bugdøy, med posisjon for målerigg markert. Aksene viser grader og minutter nord- og øst.

### 1.3.3. Kaldvika i Rosfjorden

Kaldvika ligger på vestsida av Rosfjorden, nær munningen. Fig. 1.1 viser beliggenheten til lokaliteten. Avstanden til munningen av Rosfjorden er om lag 1,5 km. Fjorden er om lag 1 km brei på dette stedet. Det er relativt grunt (15-20 m) der elektroden tenkes plassert. Fig. 1.5 viser en kartskisse av lokaliteten, med posisjon for strømmålerrikken markert.



**Figur 1.5.** Kartskisse over lokalitet Kaldvika i Rosfjorden, med posisjon for målerigg markert.



## 1.4. Kjemiske prosesser ved elektroden

Klor-kjemien i vannet omkring elektrodene vil være svært kompleks. Tidligere utredninger har understreket dette. Det vil være usikkerhet tilknyttet både reaksjonsformer og tids/likevektskonstanter. Foreliggende utredning tar utgangspunkt i eksisterende og tilgjengelig kunnskap på dette området.

I hovedsak kan det sies at enkelte negativt ladede ioner og molekyler i sjøvannet oksideres (-avgir elektroner) ved anoden, og at det dannes vesentligst klor og oksyngass som elektrolyseprodukter. Det er også en viss varmeutvikling ved anoden.

### 1.4.1. Oksygen

Det vil dannes noe oksyngass når elektroden drives som anode. Det er vanskelig å tallfeste mengdene. Dersom bare oksygen og dermed ikke noe klor dannes, er det tale om av størrelsesorden 130-140 mg/s ved 1.600 A for en grafittelektrode. I praksis vil det sannsynligvis produseres bare noen få prosent av dette, i og med at klorproduksjon dominerer. Oksygentilførsler har positiv effekt for vannkvaliteten rundt anoden, dersom det fra før har vært tendens til permanent eller periodevis lave oksygenverdier i resipienten.

Det antas at sjøvannet på lokalitetene for det meste er tilnærmet 100 % mettet på oksygen (jamfør resultatene fra prøvetakingen, Tabell 3.2). I så fall vil den produserte oksyngassen fordeles som små bobler i stedet for å være løst i vannet. Dette vil i så fall ha en viss positiv effekt på blandingsprosessene over elektroden, ved at boblene kan stimulere/generere en viss vertikalblanding. Det forventes ikke at oksygenproduksjonen vil ha noen negative konsekvenser, og dette diskuteres derfor ikke videre i denne utredningen.

### 1.4.2. Varme

Det forventes en viss produksjon av varme ved elektroden. Keussen (1994, referert av Poléo og Harboe 1996) fant ingen forskjell i målt temperatur like over og 100 m fra elektroden (katoden). Det er imidlertid uklart hvor sterk vannstrømmen var når disse temperaturmålingene fant sted, og om det ble målt oppstrøms eller nedstrøms elektroden. I sin reviderte rapport har Koops (1996) under gitte forutsetninger eksempelvis beregnet oppvarmingen av et 1 m tykt sjikt over elektroden p.g.a. ohmsk motstand til bare 0,0015 grader.

Koops sine forutsetninger kan være noe forskjellig fra forholdene på Skagerrak-kysten. Det er også sannsynlig at de kjemiske reaksjonene medfører en viss varmeproduksjon. Men begge disse bidragene må uansett antas å være marginale og uten negativ effekt på miljøet rundt. Enhver oppvarming av elektrodene vil bidra til å gjøre vannet over lettere. Siden sjøtemperaturen vanligvis avtar med dypet, vil vannsøylen dermed bli mindre stabil, evt. ustabil, noe som vil stimulere vertikalblanding og fortykning av elektrolyseprodukter.

### 1.4.3. Klor

I forbindelse med konsekvensvurderinger av sjøelektroder er det klorgass og sekundære produkter av denne det fokuseres på. Det dannes også andre halogenforbindelser, først og fremst bromforbindelser.

Klorid-ioner i sjøvannet oksyderes til klorgass i h.h. til følgende reaksjon:



Klorgass løses umiddelbart i sjøvannet. Løst klor reagerer raskt med vannet slik at det dannes hypokloritt ( $\text{OCl}^-$ ) og kloridioner ( $\text{Cl}^-$ ). Hypokloritt er sterkt oksyderende, og reagerer med oksiderbart stoff som måtte være tilgjengelig, slik som organismer og løst organisk materiale i sjøvannet.

#### 1.4.4. Forventet klorproduksjon

Mengdene av klor (fritt klor) som produseres ved elektrodene avhenger i første rekke av den elektriske strømstyrken og elektrodetype. Begge deler er gitt for de foreliggende vurderingene:

*Elektrodetype:* Grafitt-elementer, ca 50 stk, fordelt over et bunnareal på ca 200 m x 100 m.  
Effektivt areal (elektrodeflate) vil bli ca 400 m<sup>2</sup>.

*Strømstyrke:* 1.600 A pr. elektrodeanlegg.

Det er aktuelt med ett eller to anlegg pr. lokalitet. I Breivika (ved Hidrasundet) og ved Bugdøy kan det bli aktuelt å utplassere 2 elektrodeanlegg.

I følge tidligere utredninger vil det for et anlegg av nevnte størrelsesorden produseres maksimalt ca 600 mg  $\text{Cl}_2$  pr. sekund. Dette er en "worst-case" verdi som gjelder dersom det samtidig ikke dannes noe oksygen. Om lag 74 % av produsert klor omdannes umiddelbart eller raskt til hypokloritt (fritt klor eller rest-klor), som så igjen etter hvert reduseres til klorid og uskadeliggjøres. Koops (1996) anslår halveringstiden for hypokloritt til 20 minutter. Det skjer m.a.o. ikke bare en kontinuerlig fortykning av utskilt klor, men også en kontinuerlig kjemisk omdanning i vannmassene.

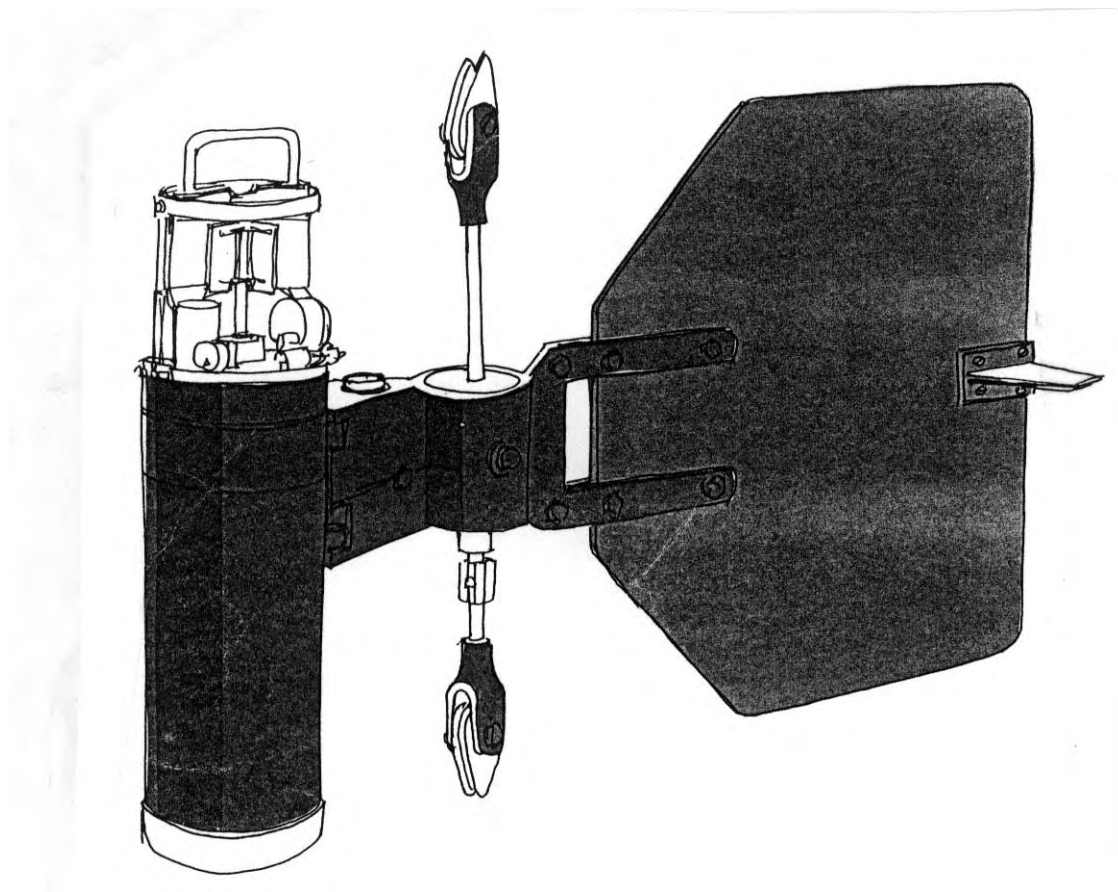
## 2. MÅLEPROGRAMMET

I dette kapitlet beskrives måleprogrammet som ble gjennomført våren 1996. Det blir også presentert noe informasjon om instrumentene og metodene som ble benyttet.

### 2.1. Målinger av vannstrøm

#### 2.1.1. Instrumenter

Måling av vannstrømmen på lokalitetene ble gjort med Aanderaa Instruments strømmålere (fig. 2.1). Strømfarten (strømstyrken) registreres ved hjelp av en rotor som sitter på toppen av instrumentet. Rotoromdreiningene registreres av logge-enheten i instrumentet ved hjelp av en magnet som sitter i underkant av rotoren. Strømretningen registreres ved hjelp av det store roret (fig. 2.1) og et innebygget kompass som avleses elektronisk. Målerne registrerer også sjøens temperatur og salinitet (egentlig konduktivitet).



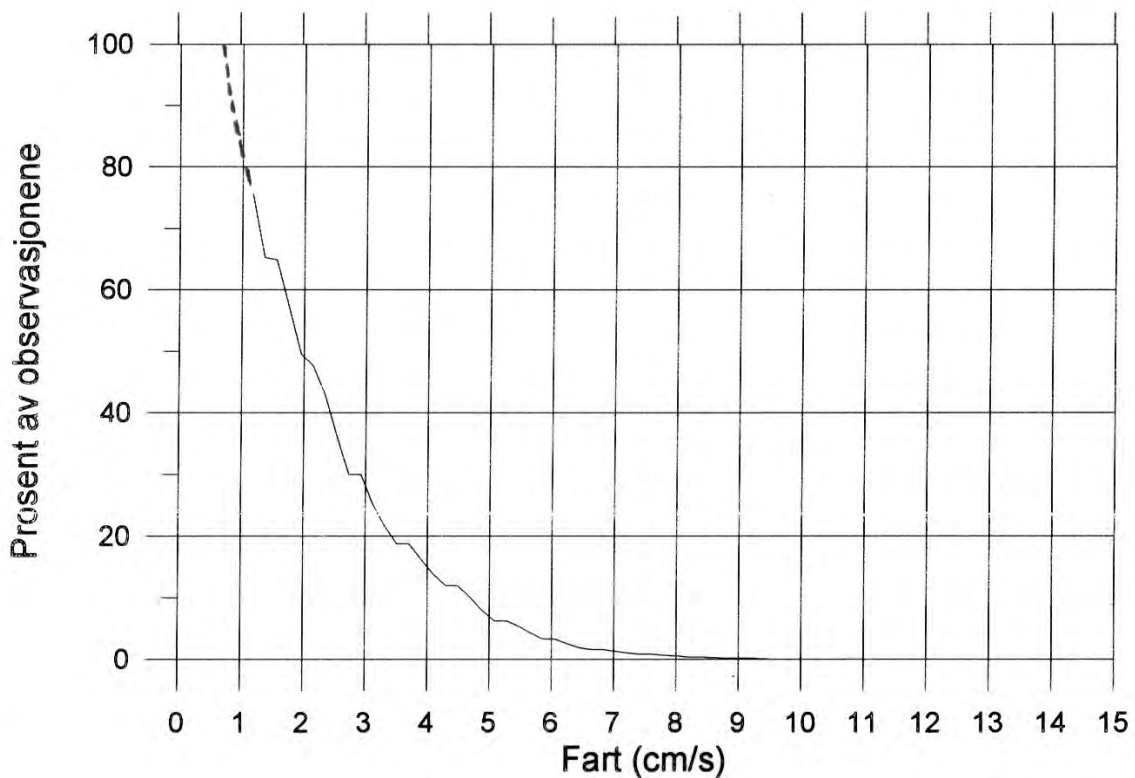
**Figur 2.1.** Skisse av en Aanderaa Instruments strømmåler.

Målenøyaktigheten for de enkelte sensorene på Aanderaa Instruments strømmålere er oppgitt til (Aanderaa Instruments, 1983):

Konduktivitet:	$\pm 0.1$ mmho/cm (milli-Siemens/cm)
Temperatursensoren:	$\pm 0.05^\circ\text{C}$
Strømretning:	$\pm 7.5^\circ$ når farten er 2.5-5 cm/s $\pm 5^\circ$ når farten er 5-100 cm/s
Fart:	$\pm 1$ cm/s eller $\pm 2\%$ av farten.

Farten vektormidles over måleintervallet (f.eks. 10 minutter), mens temperaturen og saliniteten er øyeblikksverdier på slutten av måleintervallet. Måleintervallet ble satt til 10 minutter for målingene på elektrode-lokalitetene på Sørlandet.

Aanderaa Instruments strømmålere har en terskelverdi på 1.1 cm/s (på RCM7 # 2608 er denne verdien lik 1.5 cm/s, grunnet annen type rotor). Det vil si at vannstrøm som er svakere enn dette ikke klarer å sette rotoren i bevegelse. Aanderaa Instruments velger å sette strømstyrken lik 1.1 cm/s (1.5 cm/s for RCM7 # 2608) for observasjoner hvor rotoren ikke er satt i bevegelse. Det vil si at midlere strømstyrke for en tidsserie med ingen rotorregistreringer vil bli 1.1 cm/s (1.5 cm/s for RCM7 # 2608).



**Figur 2.2.** Kumulativ fordeling av strømdataene fra målereren som var plassert 6 m over bunnen i Kaldvika. Instrumentets terskelverdi er 1,1 cm/s. Den stiplede ekstrapolerte kurva krysser 100% linja ved ca 0,75 cm/s, som viser at det aldri var helt strømstille.

Den faktiske midlere styrken på vannstrømmen i måleintervallet med “null” strøm vil ligge litt under denne terskelverdien. Kurver for kummulativ fordeling (%-vis overskridelse) for målinger av vannstrømmens styrke viser erfaringsmessig en bratt eksponensialkurve i området ned mot de laveste hastighetene. Om en ekstrapolerer kurven forbi terskelverdien (1,1 cm/s) opp til kryssning av 100% linjen, framkommer en verdi rundt 0,8 cm/s. Se fig. 2.2. Det vil m.a.o. alltid være en viss bevegelse i de vannmassene vi har målt i.

### 2.1.2. Strømrigger.

Alle riggene var bygd på samme vis, bare tauet opp til oppdriftsbøyene ble justert etter bunndypet på de forskjellige lokalitetene. Fig. 2.3 viser ei prinsippskisse av en rigg.

Alle riggene hadde overflatemarkør. Dette er ikke optimalt fordi riggen vil kunne bli satt i bevegelse av høye bølger. Men på de relativt skjermede lokalitetene var det ikke forventet stor bølgeaktivitet eller bølgehøyder på over 1 m. Måleresultatene har derfor ikke blitt influert av dette.

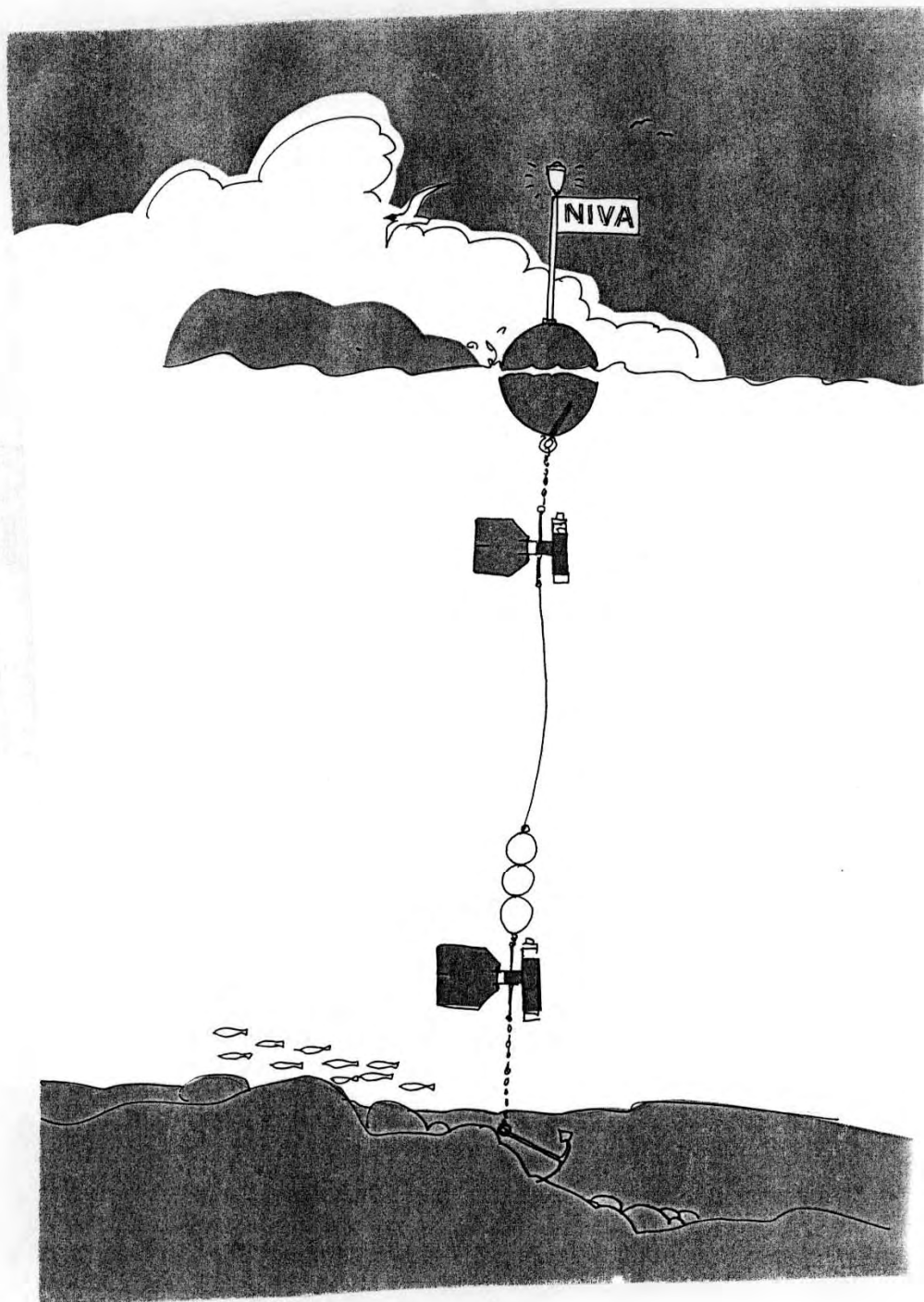
Instrumentene ble holdt i konstant avstand fra bunnen ved hjelp av neddykkede oppdriftskuler, med slakk fra øverste kule til overflatemarkøren. Instrumentene stod oppankret henholdsvis 2 og 6 meter over bunnen. Overflatemarkøren var utstyrt med flagg, lys og radarreflektor for å være synlig for fartøy i området. Det var trukket ei line fra ankeret og inn til land for sikre seg mot at riggen skulle skli ned eventuelle bunnskråninger.

### 2.1.3. Måleposisjoner

Posisjonene til strømmålerriggene er inntegnet i fig. 1.2, 1.4 og 1.5. Tabell 2.1 viser en oversikt over alle strømmålingene som ble gjort, med opplysninger om sted, instrument nummer, posisjon, dato etc.

**Tabell 2.1** Tabellen inneholder opplysninger om sted, strømmåler nummer, posisjon, dato for utsetting, dato for opphenting, hvor lenge måleren stod ute, hvor dypt måleren stod samt bunndyp. Posisjonene refererer seg til Europeisk datum (ED50), og ble bestemt ved hjelp av DGPS navigasjon med nøyaktighet bedre enn 2 meter (kontrollert ved kai i Farsund).

Sted	RCM7 instr. nr.	Posisjon (bre/len)	Utsetting (dato)	Opphenting (dato)	Periode (dager)	Måledyp (m)	Bunndyp (m)
Bugdøy	2608	58° 4.65N 6° 55.46E	19/3-96	18/4 -96	30	58	60
Bugdøy	8362	58° 4.65N 6° 55.46E	19/3-96	18/4 -96	30	54	60
Breivika, Hidrasundet	276	58° 15.48N 6° 30.74E	20/3-96	18/4 -96	29	32	34
Breivika, Hidrasundet	9704	58° 15.48N 6° 30.74E	20/3-96	18/4 -96	29	28	34
Kaldvika, Rosfjorden	4772	58° 3.65N 6° 58.55E	19/3-96	18/4 -96	30	12	14
Kaldvika Rosfjorden	11327	58° 3.65N 6° 58.55E	19/3-96	18/4 -96	30	8	14



**Figur 2.3.** Prinsippskisse av en strømmåler-rigg. I det foreliggende prosjektet var oppdriftskulene plassert over øverste strømmåler.

#### 2.1.4. Måledyp

Det ble valgt å måle vannstrøm henholdsvis 2 og 6 meter over bunnen på de stedene der elektrodene er tenkt plassert.

#### 2.1.5. Måleperiode

Det var avtalt å måle vannstrøm over en periode på 4 uker, samtidig på de tre lokalitetene. En 4 ukers måleperiode strekker seg over to vanlige spring/nipp tidevannsperioder. En skulle således få med seg de fleste av variasjonene i vannstrøm forårsaket av tidevannet. Eventuelle langperiodiske variasjoner eller episodiske fenomener vil en imidlertid ikke nødvendigvis kunne oppdage med såpass kortvarige målinger.

## 2.2. Hydrografimålinger

Det ble gjort hydrografimålinger, d.v.s. måling av sjøens temperatur og salinitet i ulike dyp, både ved utsetting og opphenting av riggene. Dette var først og fremst for å avdekke eventuell sjikting (lagdeling) i vannsøylen, og dessuten få en indikasjon på saliniteten og dermed kloridinnholdet i sjøvannet. Begge deler er nyttig informasjon ved de påfølgende modellberegningene.

#### 2.2.1. Instrumenter

En nedsenkbar Sea-Bird STD (salinitet, temperatur, dyp) sonde ble benyttet, denne registrerer 2 ganger i sekundet og lagrer internt. Det ble også benyttet en UCM40 (Simtronix). Dette er en akustisk strømmåler som også registrerer salinitet, temperatur og dyp. Tabell 2.2 gir en oversikt over hydrografimålingene (sted, instrument, dato og dyp).

**Tabell 2.2.** Tabellen gir en oversikt over hydrografimålingene i mars - april 1996.

Sted	Instrument	Dato	Bunndyp (m)
Rosfjorden	Sea-Bird	19/3	15
Rosfjorden	Sea-Bird	19/3	15
Rosfjorden	UCM40	18/4	15
Bugdøy	Sea-Bird	19/3	60
Bugdøy	Sea-Bird	18/4	60
Bugdøy	UCM40	18/4	60
Breivika	Sea-Bird	20/3	45
Breivika	UCM40	20/3	34
Breivika	Sea-Bird	18/4	45
Breivika	UCM40	18/4	34

### **2.2.2. Vannprøver**

Det ble tatt vannprøver for kjemisk analyse av oksygeninnholdet i sjøen, i h.h.t. Winklers metode. Oksygeninnholdet indikerer om vannutskiftingen er god eller dårlig i det aktuelle området. I overflatevann og i områder med god vannutskifting vil oksygen-konsentrasjonen normalt ligge omkring 100 % metning. D.v.s. på rundt 10 mgO<sub>2</sub>/l. I stagnerende vannmasser vil oksygen-konsentrasjonen normalt avta. De fleste prøvene ble tatt nær bunn, siden vannutskiftingen kunne forventes å være dårligst der. Det var imidlertid ikke forventet spesielt lave oksygenverdier på de aktuelle målestedene i måleperioden mars - april, som gjerne faller sammen med storskala utskifting på kysten og i fjordene.

Vannprøvene ble tatt med en Niskin vannhenter. Denne fires ned åpen, slik at vannet fritt kan strømme gjennom under nedfiring. Vannhenteren lukkes på ønsket dyp ved hjelp av et slipplodd som følger tauet nedover til det treffer en utløser-mekanisme på vannhenteren.

Tabell 2.3 gir en oversikt over sted, dato og dyp for oksygenprøvetakingen. Det ble samtidig tatt ordinære vannprøver for eventuell analyse seinere, i tilfelle spesielle problemstillinger skulle aktualisere det.

### **2.3. Bunnprøver**

Det ble tatt prøver av øvre del av sedimentet på de tre lokalitetene. Prøvene ble tatt med en Van Veen Grabb. Opplysninger om prøvene (konsistens m.m.) utgjør et supplement til andre målinger for å bedømme strømforholdene generelt på stedet. Alle bunnprøvene ble tatt i nærheten av strømmåler-riggene (se kart i kapittel 1). Ved Bugdøy ble det tatt bunnprøver også i de grunne områdene nær land. I Hidrasundet (Breivika) ble det i tillegg til å ta prøver ved strømmåler-riggen, også tatt bunnprøver fra den dypeste delen av Breivika.



**Tabell 2.3.** Oversikt over sted, dato og dyp for oksygenprøvene.

<b>Sted</b>	<b>Dato, 1996</b>	<b>Prøvetakingsdyp (m)</b>
Bugdøy	19/3	45
"	"	35
"	18/4	55
"	"	45
"	"	35
"	"	25
Rosfjorden	19/3	15
"	"	10
"	18/4	15
"	"	10
Hidasundet	19/3	45
"	"	35
"	"	25
"	"	15
"	18/4	45
"	"	35
"	"	25
"	"	15

### 3. RESULTATER

I dette kapittelet presenteres hovedtrekkene i datamaterialet fra målingene. Resultatene blir nærmere diskutert i kapittel 4, i forhold til problemstillingen.

#### 3.1. Målinger av vannstrøm

Resultatene fra målingene av vannstrøm er vist som figurer i appendiks. Figurene viser tidsserier (måleserier) av strømhastighet, retning, temperatur og salinitet. Det er også plottet opp en statistisk fordeling av vannstrømmen ved hjelp av "strømroser" (se fig.A7-A9 i appendiks). I strømrosene er midlere strømstyrke, maksimal målt strømstyrke, antall målinger og relativ fluks (antall målinger multiplisert med middel styrke) beregnet og fordelt i 15 graders intervaller for tilhørende (målt) strømmretning. Dermed får en et bilde på hvilke strømmretninger som har forekommet hyppigst, og hvilke retninger som har hatt sterkest vannstrøm, etc.

For hver måleserie er det blitt beregnet vektormiddel for hver måleserie for vannstrøm, middel temperatur, middel salinitet samt strømmens stabilitetsfaktor. Stabilitetsfaktoren er definert som summen av absoluttverdiene av alle enkelt-målingene for strøm ("strømpilene") delt på absoluttverdien for vektorsummen. Dette gir et tall mellom 0 (tilsvarende svært vekslende strømmretning) og 1 (tilsvarende ensretta vannstrøm). De beregnede verdiene er gitt i tabell 3.1, sammen med andre statistiske verdier. Tabellen gir opplysninger om målested og avstand fra strømmåleren ned til bunnen. Videre resultater for beregnet middel strømstyrke, styrke på vektormidlet strøm (nettostrøm) og tilhørende retning, middel temperatur, middel salinitet og vannstrømmens stabilitetsfaktor (Stab, som forklart ovenfor).

**Tabell 3.1.** Resultater/beregnete verdier fra målingene av vannstrøm.

Måle-lokalitet	Måledyp (m.o.b.)	Middel strøm- styrke (cm/s)	Netto- strøm (cm/s)	Nettostrøm- retning i grader og tilsv. retn.	Middel- Temp (°C)	Middel Salinitet (ppt)	Stab
Bugdøy	6	1.57	0.80	86° (E)	6.12	34.02	0.51
Bugdøy	2	1.38	1.34	155° (SE)	6.14	34.65	0.97
Kaldvika	6	2.46	0.91	91° (E)	3.87	30.43	0.37
Kaldvika	2	1.22	0.84	44° (NE)	4.12	31.46	0.69
Breivika	6	1.51	0.97	236° (SW)	5.04	33.14	0.64
Breivika	2	1.37	1.15	288° (W)	6.03	33.38	0.84

##### 3.1.1. Bugdøy

Vannstrømmålerne stod oppankret henholdsvis på 54 m og 58 m dyp.

Strømmåleren i 58 m dyp (2 meter over bunnen) hadde fått roret delvis blokkert av landtauet. Den høye stabilitetsfaktoren indikerer at dette har skjedd under utsetting eller like etter. Sammenligner en med målingene i 54 m dyp ser likevel dataene relativt like ut, og at de dermed sannsynligvis er rimelig realistiske. En kan forvente at vannstrømmen er litt underestimert i perioder hvor strømmåleren ikke har klart å dreie med vannstrømmen. Da kan rotoren tidvis ha vært delvis dekket av rotorskjermen (se fig. 2.1).

Tidsserieplottene i appendiks (fig. A1 og A2) viser at dette er en strømsvak lokalitet. Henholdsvis 76 % (2 meter over bunnen) og 82 % (6 meter over bunnen) av observasjonene har strøm lavere enn terskelverdien for måleinstrumentet på 1,1 cm/s (jamfør med avsnitt 2.1.1).

Til og begynne med var det svak vannstrøm i begge dyp. I begge dyp fulgte så en periode på 3-4 dager med litt sterkere vannstrøm. I resten av perioden var det på det nærmeste strømstille (2-3 uker).

Retningsobservasjonene (appendiks, fig. A2) viser at vannstrømmen 6 m over bunnen til å begynne med var nordvestlig. Den fulgte med andre ord topografien innover fjorden. Samtidig var temperaturen rundt 6,4°C og saliniteten 33,8. Den 25.-27. mars dreide strømmen mot sørøst (ut av fjorden) samtidig som temperaturen avtok (6,1°C) og saliniteten økte (34,2). Noe liknende skjedde også 2 meter over bunn (appendiks, figur A1).

### **3.1.2. Kaldvika i Rosfjorden**

Vannstrømsmålerne stod oppankret henholdsvis på 8 m og 12 m dyp. M.a.o. vesentlig grunnere enn ved de andre lokalitetene.

Kaldvika i Rosfjorden er den mest strømsterke av de tre undersøkte lokalitetene, om en betrakter forholdene i begge måledypene under ett. Figur A4 i appendiks viser at det 6 meter over bunn var vannstrøm mellom 2-10 cm/s hele perioden. 2 meter over bunn var strømmen svakere, men signifikant mesteparten av tida.

2 meter over bunn strømmet vannet inn fjorden nesten hele tida, mens det var utgående strøm 6 meter over bunn. Dette såkalte strømskjæret vil være gunstig for blanding/omrøring i vannsøylen.

Temperatur- og salinitetsvariasjonene var relativt store og identiske i begge dyp. Dette er som forventet fordi det bare var 4 meter mellom måledypene og fordi vika ikke er sperret av noen terskel. Målingene er gjort i laget som er påvirket av avrenning fra land.

### **3.1.3. Breivika i Hidrasundet**

Vannstrømsmålerne stod oppankret henholdsvis på 28 m og 32 m dyp.

Tidsserieplottene i Appendiks (fig. A5 og A6) viser at lokaliteten periodevis har svak vannutskifting nær bunn. Henholdsvis 59 % (2 meter over bunnen) og 66 % (6 meter over bunnen) av observasjonene hadde vannstrøm lavere enn terskelverdien for måleinstrumentene. Innløpet til Breivika har største dyp på om lag 30 m (jamfør med avsnitt 1.3.1). I dybder fra dette nivået og dypere kan det dermed ut fra de topografiske begrensingene forventes at vannstrømmen er svak, mens den nok er sterkere lenger oppe i vannsøylen.

6 meter over bunn var det en del episoder med sterkere vannstrøm, 2 meter over bunn var det bare én episode.

6 meter over bunn varierte strømrretningen mellom sør/vestlig og nord/vestlig, mens det var vestlig strøm 2 meter over bunn nesten hele tida.

Terskeldypet i Breivika er rundt 30 meter (ref. kapittel 1). Dette var også det omtrentlige dypet for strømmålerne. Temperatur og salinitetsobservasjonene fra 6 meter over bunn viste store

variasjoner, mens det var små variasjoner 2 meter over bunn (28m). Den dypeste måleren har stått under terskeldypet, og det er liten utskifting av vannet her.

### 3.2. Forekomst av perioder med svak vannstrøm

Hver måleserie for strøm er analysert spesielt med tanke på å finne hvor ofte/hvor lenge strømmen lå under eller på grensen av det som måleinstrumentene kunne registrere. Formålet med denne "varighetsanalysen" var å finne andre parametre enn midlere strømstyrke som kan bidra til å beskrive strømforholdene. Hyppig forekomst av perioder med stagnerende vann vil virke mindre gunstig for fortykning av elektrolyseprodukter i sjøen.

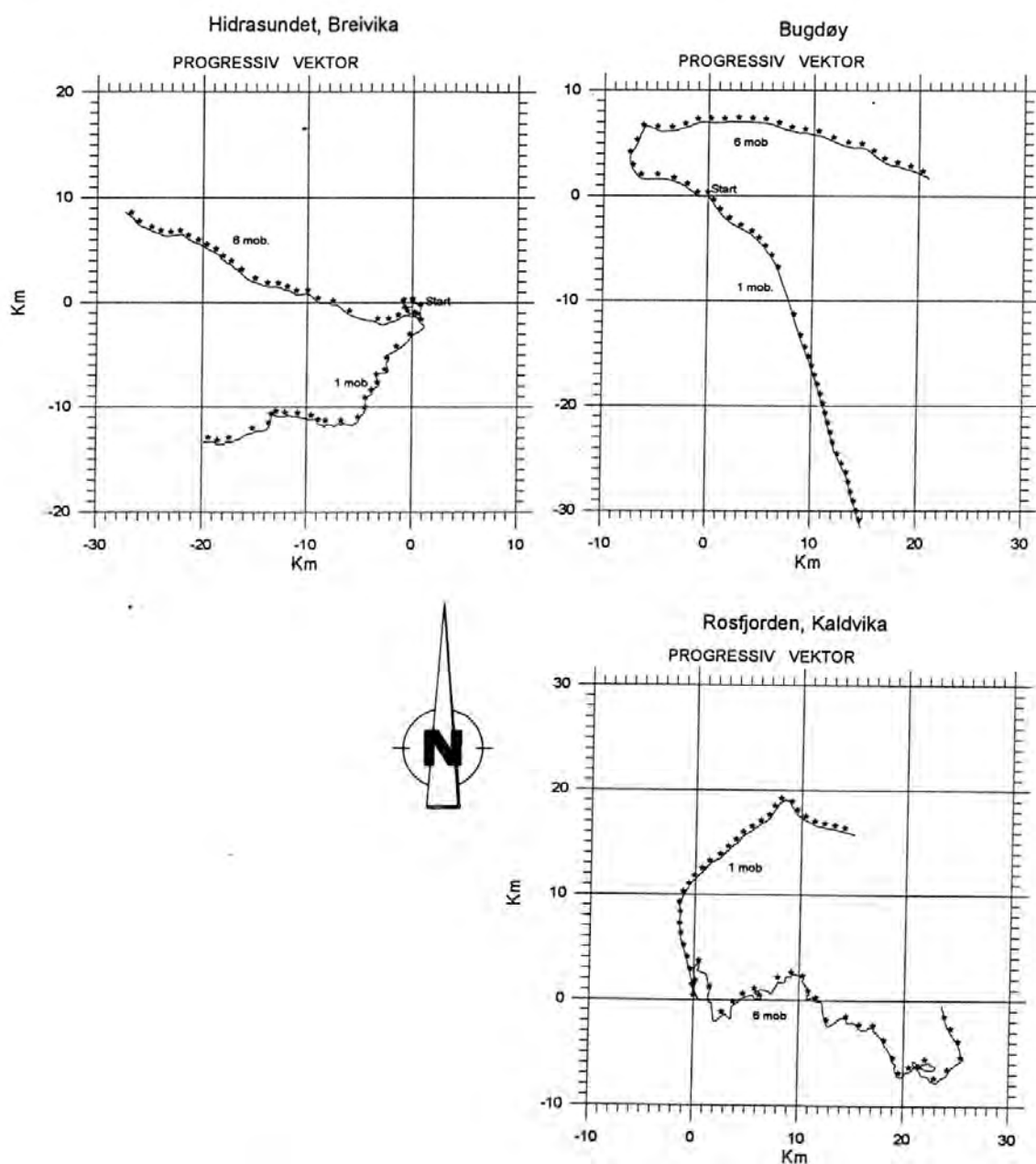
Tabell 3.2 viser resultat fra disse beregningene, der vi har benyttet en grenseverdi på 1,5 cm/s for vannstrømmen, og så funnet hvor mange ganger eller perioder strømmen vedvarende lå under den gitte grenseverdien. Videre har vi beregnet hvor stor del av tiden (i %) dette tilsvarer, samt hvor lang en typisk periode med svak strøm var. Resultatet viser at for begge måledypene sett under ett hadde Kaldvika de gunstigste forholdene, med færrest perioder med strøm under 1,5 cm/s, og tilsvarende kortest perioder med slike forhold. Bugdøy kommer tilsvarende ut med flest perioder, og også de lengste.

Tabell 3.2. Resultat fra varighetsanalysen av strømmålingene i 2 mob (meter over bunn) og 6 mob for hver lokalitet. Tabellen angir hvor stor del av tiden (i %) vannstrømmen svakere enn 1,5 cm/s, hvor mange slike perioder som forekom, og gjennomsnittlig varighet på disse periodene.

	Breivika			Bugdøy			Kaldvika		
	% av tid med strøm <1,5 cm/s	Antall perioder m/strøm <1,5 cm/s	Middel periode-lengde (minutt) <1,5 cm/s	% av tid med strøm <1,5 cm/s	Antall perioder m/strøm <1,5 cm/s	Middel periode-lengde (minutt) <1,5 cm/s	% av tid med strøm <1,5 cm/s	Antall perioder m/strøm <1,5 cm/s	Middel periode-lengde (minutt) <1,5 cm/s
2 mob	80	161	205	82	146	246	92	146	273
6 mob	78	132	245	88	151	254	35	230	66
Middel	79	147	225	85	149	250	64	188	170

Fig. 3.1 viser tids-integrerte verdier for vannstrømmen på de tre lokalitetene, basert på NIVAs strømmålinger. I disse framstillingene (progressiv vektor diagram) er hver enkelt måling av strøm i hvert 10-minutts intervall ("strøm-pil") addert fortløpende til foregående, slik at det dannes en fiktiv strømtrajektorie (strøm-bane). Denne gir inntrykk av vannstrømmens variabilitet og dominerende strømretning(er).

Det framgår at det er en viss retningsforskjell fra 2 m til 6 m over bunn. Dette kan komme av grensesjiktfriksjon (Coriolis-effekt), evt. i kombinasjon med topografiske effekter. For Breivika og Kaldvika er denne forskjellen mellom de to måledypene liten. For Bugdøy er det mer markert forskjell i framherskende retning. Dette henger sannsynligvis sammen med at roret på den ene måleren ikke hang fritt hele tiden, slik at retningsmålingene ikke er helt realistiske. Strømhastigheten øker også i størrelse fra 2 m over bunn til 6 m over bunn på alle lokalitetene.



**Figur 3.1.** Progressiv vektor diagrammer for målingene av vannstrøm på de tre lokalitetene. Hver enkeltmåling ("strømpil") er addert fortløpende til den foregående. Stjernene markerer overgang til nytt døgn i måleseriene. Startpunktet er lagt i koordinaten (0,0).

Resultatene viser dermed at lokalitetene har normale grensesjikt-betingelser for vannstrøm, som forutsatt i modellberegningene. Resultatene (fig 3.1) viser også framherskende strømrretning over tid på de ulike målestedene, med vesentlig vest-sørvestgående vannstrøm i Breivika, øst-nordøstlig i Kaldvika og øst-sørøstlig ved Bugdøy. Dersom forholdene ellers gjør det mulig, bør det være mulig å orientere elektrodene slik at de mest mulig ligger på tvers av framherskende strømrretning.

### 3.3. Hydrografiske profiler og oksygen

Alle profilene tatt med Sea-Bird sonden er vist i appendiks (fig. A13 - A18). Resultatene fra oksygenmålingene er gitt i tabell 3.2.

**Tabell 3.2.** Oksygenmålinger fra Kaldvika i Rosfjorden, Bugdøy og Breivika i Hidrasundet.

Sted	Dyp (m)	Oksygen 19/3 (mg/l)	Oksygen 18/4 (mg/l)	Oksygen metning 19/3 (%)	Oksygen metning 18/4 (%)
Bugdøy	55		8.86		62
"	45	9.22	8.74	93	88
"	35	9.20	10.28	92	103
"	25		12.02		112
Kaldvika	15		11.36		109
"	10	12.65	11.56	113	109
Breivika	45	7.60	8.5	77	86
"	35	11.24	9.22	113	93
"	25	11.80	11.68	115	114
"	15	11.42	12.18	109	115

#### 3.3.1. Bugdøy

Profilene fra Bugdøy (appendiks, fig. A13 og A14) viser at det i mars var et relativt homogent overflatelag ned til ca. 25 meter. En skarp gradient følger så over et homogent dypere lag. I april var overflatelaget tynnere, varmere og ferskere. Gradienten til de dypere vannmassene var ikke lenger like skarp.

Oksygenverdiene avtar med dypet (tabell 3.2 og figur A14 i appendiks).

#### 3.3.2. Kaldvika i Rosfjorden

Lokaliteten i Rosfjorden er bare ca. 15 m dyp. Begge profilene (figur A15 og A16 i appendiks 1) viser at lokaliteten var dominert av brakkvann. Vannet var ferskere og varmere i april enn i mars.

Det høye oksygenverdier ved begge anledningene, men en viss nedgang i konsentrasjonen.

#### 3.3.3. Hidrasundet (Breivika)

I Breivika var det ved begge anledningene økende temperatur, salinitet og tetthet med dypet (fig. A17 og A18 i appendiks 1). Over bunn var det et 5-10 m homogent lag.

I Breivika var det høye oksygenverdier ned til terskeldypet. Under terskeldypet var verdiene noe lavere.

## 4. Diskusjon og konklusjon

### 4.1. Måledata og datarepresentativitet

Værforholdene i måleperioden for vannstrøm er den viktigste indikatoren på om i hvor stor grad forholdene har vært representative for et "middelår". Forut for og i måleperioden for vannstrøm ble det ikke notert ekstraordinære vær-situasjoner som kan ha påvirket målingene i form av ekstra lange stagnasjonsperioder eller forårsaket episoder med unormalt sterk strøm. Sett i forhold til års-variasjoner og år-til-år variasjoner som en uansett må forvente, kan målingene antas å være representative for lokalitetene.

Det vil være visse årstidsvariasjoner i forholdene når det gjelder vannstrøm. Sterkest strøm kan forventes i samband med uværperioder og ved større hydrografiske endringer på kysten. Sørvestlig vind i Skagerrak medfører en oppstuvning av vann mot nordøst, og Kyststrømmen stagnerer eller reverserer i disse situasjonene. Når vinden spakner, genereres det ekstra sterk strøm på kysten. Slike episoder kan forekomme til alle årstider, men kan være hyppigst om høsten og vinteren.

En hovedmålsetting med prosjektet var å skaffe data for forholdene når det gjelder vannstrøm/vannutskifting som grunnlagsmateriale for å bedømme og rangere lokalitetene m.h.t. egnethet for plassering av elektroder. Ved at målingene ble utført samtidig på alle lokalitetene har en fått et godt utgangspunkt for en innbyrdes rangering, uansett eventuelle årstidsvariasjoner.

De innsamlede måledataene for strøm viser at det ikke er permanent stagnasjon av vannmassene på de tre lokalitetene. Resultatene av målingene for vannutskifting var omtrent som forventet.

Målingene av vannstrøm gir også opplysninger om dominerende strømrretning på de enkelte lokalitetene. Dette kan være viktig kunnskap når elektrodene skal utplasseres. Ut fra konsentrasjon/sprednings betraktninger vil det sannsynligvis uansett være gunstigst å spre elektrode-areal mest mulig på tvers av hovedstrømmen.

### 4.2. Tidligere målte eller beregnede klorkonsentrasjoner

En klor-produksjon på opptil 600 mg  $CL_2$ /sek vil teoretisk kunne medføre en oppkonsentrering av reaksjonsprodukter av klor i vannet over elektrodene dersom det er svak eller ingen vannutskifting. Målinger utført ved eksisterende anlegg i Grosøysøyla (STATNETT 1994) ga ingen indikasjon på økning i innhold av klor eller reaksjonsprodukter ved elektrodene (1.000 A total elektrisk strøm der) etter 9 timers drift. Det er imidlertid ukjent hvordan strømforholdene i sjøen var ved måletidspunktet.

Det er tidligere gjort estimater på hvilke konsentrasjoner som kan forventes ved en gitt vannutskifting. Poléo og Harboe (1996) estimerte verdier for reaksjonsproduktet trihalometan på 0,016 mg/l etter 1 times drift av en 1.600 A grafittelektrode ved null vannutskifting. Koops (1996) anslo teoretiske hypokloritt-konsentrasjoner over grafittelektroder til maksimalt 0,05-0,1 mg/l i stagnerede vann over elektroden.

Tykeson et al. (1996) anslo til sammenlikning konsentrasjoner av reaksjonsprodukter av klor over en titanelektrode (Baltic Cable) til 0,7 mg/l for et 1 m tykt vannsjikt med 1 times stagnasjon (ingen vannutskifting i løpet av 1 time) over elektrodene. Titanelektroder genererer mindre klor enn

grafittelektroder ved aktuelle elektriske strømstyrker. Tykeson et al. forutsetter at det ikke foregår nedbryting av klor eller hypokloritt, mens slik nedbryting faktisk vil foregå.

#### **4.2.1. Grenseverdi for klorkonsentrasjon**

De nevnte overslagene eller regneeksemplene indikerer at en ved pessimistiske estimer ("worst-case") for blandingslag, vannutskifting og klorproduksjon/nedbryting teoretisk vil kunne få forhøyede konsentrasjoner av reaksjonsprodukter av klor over elektrodene. Konsentrasjonene vil kunne overskride 0,01 mg klor/l (rest-klor eller hypokloritt) som har vært STATNETT sitt utgangspunkt for grenseverdi. En tilsvarende grenseverdi er for øvrig nylig brukt ved konsekvensutredninger for klorerte utslipp fra et MTBE anlegg (MTBE er et stoff som erstatter bly i bensin) på Kårstø (Thommassen 1992).

Noen organismer som f.eks. brunalger kan ha en mye større toleranse, mens andre kan få subletale effekter ved langtidseksposering for en slik konsentrasjon (Poléo og Harboe, pers. medd.).

US EPA (United States Environmental Protection Agency) (1986) sier at 4 døgns middelvei for løst klor (i praksis hypokloritt) i sjøvann ikke skal overskride 0,0075 mg/l mer enn en gang hvert 3. år, og 1-times middelvei skal tilsvarende ikke overskride 0,013 mg/l. Disse verdiene er i rimelig godt samsvar med den grenseverdien (0,01 mg/l) som STATNETT har forutsatt, basert på UiO sin utredning (Poléo og Harboe, 1996).

Halogenforbindelser som bromoform produseres naturlig av alger og finnes naturlig forekommende i sjøvann. Fogelqvist og Krysell (1986) viser til målinger i vannsøylen i kystområdet utenfor Iddefjorden på grensen mellom Sverige og Norge. Resultatene viste at de høyeste konsentrasjonene av bromoform forekom i 10-30 m dyp i områder med mye fastsittende alger. Målte konsentrasjoner oversteg 50 µg/l (0,05 mg/l), som er vesentlig høyere enn den angitte grenseverdien på 0,01. Men det må bemerkes at giftvirkningen er forskjellig for de ulike halogenforbindelsene.

### **4.3. Nye beregninger for klorkonsentrasjon**

Vi har foretatt sprednings og fortynningsberegninger med en numerisk modell for spredning og fortykning av forurenset vann. Modellen "CORMIX" er formidlet av EPA i USA (US EPA 1995). Modellen simulerer vertikal og horisontal spredning og fortykning av spesifisert stoff eller forurensning i en resipient fra en gitt kilde. Modellen beregner konsentrasjoner som funksjon av avstand fra utslippsstedet, ut fra data om utslippet, vannstrømmen, sjikting o.l.

Vi har foretatt beregninger i to omganger. Først med et realistisk sett av inngangsverdier i forhold til det som er målt på lokalitetene og ellers med verdier i forhold til det som finnes i litteraturen. Tilsvarende har vi gjort beregninger med et sett med noe mer pessimistiske eller konservative verdier ("worst case").

#### **4.3.1. Faste inngangsverdier i modellen**

Vi har antatt at elektrode-anlegget på bunnen får et elektrodeareal på 100 m x 200 m, og at det plasseres med "breisida" (200 m lengde) på tvers av hovedstrømretningen. Dette vil gi den gunstigste fortyningen for klor. Klorutslippet fra elektroden er forutsatt å "lekke" kontinuerlig fra 50 parallelle elementer orientert langs vannstrømmens retning, jevnt fordelt over elektrodearealet. Vi har ikke gjort spesial-beregninger tilpasset bunntopografien på hver lokalitet. Dette kan evt. gjøres når elektrodeplasseringen er mer eksakt bestemt.



I modellen har vi videre forutsatt en tre-lags struktur for den vertikale sjiktning-fordelingen (lag-delingen i vannsøylen), med et øvre lag med lav egenvekt (densitet), et såkalt sprangsjikt under dette og så et homogent bunnsjikt med høyest egenvekt på vannet. Data for egenvekten til sjøvannet i de ulike lagene er beregnet ut fra de målte hydrografi-profilene (jamfør med presentasjon av måleresultatene i kapittel 3 og i Appendiks).

Sjiktet med klorholdig vann som dannes over elektrodene, vil øke i tykkelse i retning nedstrøms. Når vannet har passert over elektrodearealet, vil klortilførsler til dette grensesjiktet stoppe, og det skjer en gradvis fortykning videre nedstrøms anlegget. Konsentrasjonene avtar dermed også raskt nedstrøms.

#### **4.3.2. Inngangsverdier som er variert**

##### Vannstrømmen

Det forutsettes i modellen en vannstrøm over elektroden som forårsaker en jevn spredning og fortykning av klor. I modellen kan styrken på denne vannstrømmen varieres. Generelt kan en si at jo sterkere vannstrøm, jo bedre fortykning og lavere konsentrasjoner kan forventes. Turbulens på grunn av vannstrømmens friksjon mot elektroden og evt. konveksjonseffekt p.g.a. gassbobler vil i tillegg forårsake små vertikale bevegelser i et tynt grensesjikt like over bunn. Dette bidrar til en vertikal blanding i og over dette grensesjiktet som modellen også tar i betraktning. Jo sterkere vannstrøm, jo sterkere vil også denne blandingseffekten bli.

Vi har først lagt inn 1,5 cm/s som verdi i modellen, og deretter 1,0 cm/s. Middelerdiene for vannstrømmens styrke for alle lokalitetene ligger nærmest den førstnevnte verdien mens sistnevnte verdi vil gi et noe pessimistisk anslag ("worst case") for konsentrasjoner.

##### Klor-produksjon

Vi har i første beregningsomgang forutsatt en produksjon av klor på 300 mg/s, som er 50% av det som er oppgitt som teoretisk maksimum. 600 mg/s er som tidligere nevnt i avsnitt 1.4.5 langt høyere enn det som er realistisk for et anlegg av angitte størrelse, og 300 mg/s kan antas å ligge nærmere det realistiske. Som "worst case" har vi også gjort beregninger med 600 mg/s produksjon.

##### Halveringstid for klor

I tillegg til fortykning/spredning i vannmassene vil klor (egentlig rest-klor) også bli gradvis nedbrutt kjemisk. Halveringstiden for klor er et uttrykk for hvor raskt denne nedbrytningen skjer, og den avhenger i første rekke av mengden organisk stoff oppløst eller tilgjengelig i vannet. Jo mer organisk stoff, jo raskere skjer nedbrytningen og jo kortere blir halveringstiden.

Koops (1996) med referanse til Nederlandsk kystfarvann oppgir en halveringstid på 10-30 minutter, avhengig av organisk innhold i vannet. Konsentrasjonen av organisk stoff (organiske partikler) som er tilgjengelig i sjøvannet på Sørlandskysten vil sannsynligvis ligge noe under konsentrasjonene utenfor Nederland, der mange store elver bidrar med betydelige mengder organisk stoff. En midt-på-treet verdi på 20 minutter for halveringstid er sannsynligvis et realistisk utgangspunkt, og vi har først benyttet denne verdien, og dernest ingen nedbryting (som "worst case").

### 4.3.3. Resultater

#### 1. beregning, med antatt realistiske verdier:

Valgte parametre: 1, 5 cm/s vannstrøm, 20 minutter halveringstid for klor og 300 mg/s klorproduksjon.

Resultatene viser at det like over elektroden vil bli dannet et tynt gjennomblandet lag som øker til ca 2 m tykkelse i nedre ende av elektrode-areale. Influensområdet nedstrøms anlegget i forhold til grenseverdien på 0,01 mg/l, (d.v.s. området der klorkonsentrasjoner i sjøvannet kan overskride 0,01 mg/l) blir maksimalt ca 5 meter fra anlegget.

#### 2. beregning, med antatt pessimistiske verdier (“worst case”):

Valgte parametre: 1, 0 cm/s vannstrøm, ingen nedbryting av klor (“uendelig lang” halveringstid) og 600 mg/s klorproduksjon.

Maksimalkonsentrasjonene i dette laget (over elektrodene) kan teoretisk sett bli opptil 0,1 mg/l total-klor like over elektroden (i grensesjiktet vann - elektrode). Nedstrøms anlegget avtar konsentrasjonene raskt, og er lavere enn 0,01 mg/l (grenseverdien) ca 150 m nedstrøms. Dermed vil influens-området for en slik betraktning gjelde selve elektrode-areale, samt et areal på maksimalt 200 m x 150 m nedstrøms anlegget. På grunn av de pessimistiske forutsetningene for beregningene (avsn. 4.3.1 og 4.3.2), gir dette regneeksempelet som tidligere nevnt et urealistisk stort influensområde.

## 4.4. Vurderinger

Beregningene har tatt som utgangspunkt verdier for vannstrøm som ligger rundt målte middelveidier, eller i underkant av dette. Målingene viste at Kaldvika hadde noe sterkere middelstrøm enn 1,5 cm/s, mens de andre to lokalitetene hadde middelveidier rundt dette (tabell 3.1). Videre syntte målingene at det periodevis var vesentlig sterkere vannstrøm enn 1,5 cm/s (ref. kapittel 3).

Sterkere vannstrøm vil gi bedre/raskere blanding, og i realiteten bidra til at det reelle influensområdet kan bli enda mindre enn det beregnede for “realistiske” verdier. På den andre siden må en huske at det tidvis også var perioder med vannstrøm vedvarende under terskelverdien på 1,1 cm/s for måleinstrumentene. Middelveidien for styrken av vannstrømmen i slike perioder vil ligge litt i underkant av 1,0 cm/s (jamfør diskusjonen i kapittel 2).

En summarisk oversikt over de viktigste faktorene som bidrar i retning av reduserte klorkonsentrasjoner i forhold til modellberegningene for “worst case” blir som følger:

	Vannstrøm	Klorprod.	Nedbrytn. hast	Temp. endring
"Konservative" verdier benyttet i beregningene for “worst case”:	1 cm/s	600 mg/s	ingen nedbrytn.	+ 0,1 °C
Sanns. realistiske verdier:	1,5 cm/s	300 mg/s	20 min	<< +0,1 °C
%-vis bidrag til red. influensområde	30-50%	> 50%	+/- 20%	(10%)

Det framgår at verdien for klorproduksjon er en viktig faktor, men at vannstrømmen også er viktig.

Foreliggende beregninger har ikke gått i detalj når det gjelder vannkjemien. Tidligere omfattende utredninger (bl.a. Poléo og Harboe, 1996) har understreket at dette er en meget kompleks materie, som blant annet avhenger av lokale forhold. Ovenstående beregninger ville bli mer presise om en hadde mer nyttbar kunnskap vannkjemien.

Modellberegningene tar heller ikke hensyn til at elektrodeanleggene skal overdekkes med masse (K. Faugstad, pers. medd.). Dersom det dreier seg om slam eller løsmasse, vil denne inneholde mye organisk stoff, som sannsynligvis i en tid etter etableringen av anlegget vil bidra til ennå raskere nedbrytning og kortere halveringstid enn det som er forutsatt ovenfor, og dermed lavere maksimumskonsentrasjoner, og mindre influensområde (jamfør målingene i Groosøysøyla). Tilgjengelig organisk materiale vil imidlertid etter en tid sannsynligvis være nedbrutt, og dermed ikke lenger bidra til reduserte maksimumskonsentrasjoner og mindre influensområde.

Nedbrytning av hypokloritt på grunn av sollys har vært nevnt som en faktor som ytterligere kan bidra til redusert effekt og influensområde. Siden det er tale om vanddybder større enn 10-15 meter, er imidlertid denne faktoren neppe av betydning.

De ovenstående modellberegningene vil i prinsippet kunne anvendes på alle lokalitetene. Beregningene viste at det er sjiktet med 2-3 m tykkelse like over elektroden som kan bli påvirket av elektrolyseprodukter. Dermed spiller avstand til sjøoverflaten mindre rolle, så lenge vi snakker om dyp større enn 15 m for plassering av elektrodene.

Planktoniske alger forekommer mest i den øvre delen av vannsøylen så lang lyset når ned, anslagsvis i de øvre 20 m. Dersom elektrodene anbringes dypere enn 20 - 25 m, vil dermed effekten på algene bli minimalisert. Organismer som da vil kunne bli eksponert, er fastsittende tare, fisk og bunnlevende organismer som kan ha en større toleranse for klor enn alger, eller som kan unngå området.

#### **4.4.1. Plassering av anleggene**

Målingene av vannstrøm vil danne et viktig grunnlag for å finne optimal orientering og plassering av elementene i forhold til dominerende strømreretning (ref. kapittel 3) når de aktuelle lokalitetene er utvalgt, og anleggene skal utplasseres. Den beste plasseringen vil sannsynligvis være å legge anleggene mest mulig på linje tvers av hovedstrømmen. Dette for å unngå eventuelle adderende nedstrøms effekter. Men her kan lokale bunntopografiske faktorer kreve en lokal tilpassning.

#### **4.4.2. To anlegg på samme lokalitet**

Det er også blitt lansert et alternativ med å legge to anlegg på samme sted, med samlet kapasitet på 3.200 A på en lokalitet. De forutgående beregningene var basert på ett anlegg med 1.600 A kapasitet fordelt på et gitt areal. Dette vil si at klorproduksjonen med de gitte forutsetninger samlet kan bli doblet på lokaliteten. Men resultatene fra beregningene ovenfor for influensområde kan i prinsippet fortsatt benyttes, i og med at en kan anta at klorproduksjonen pr. m<sup>2</sup> elektrodeflate blir den samme (samme elektrodetetthet eller A pr. m<sup>2</sup>).

#### **4.4.3. Rangering av lokalitetene**

Forekomst av sammenhengende perioder med svak vannstrøm gir et grunnlag for å rangere lokalitetene m.h.t. egnethet. I kapittel 3 presenterte vi beregninger av forekomst og varighet av perioder med lite vannstrøm (tabell 3.2). Resultatene viste at for begge måledypene sett under ett

hadde Breivika færrest perioder med vedvarende svak strøm og tilsvarende kortest midlere varighet av slike perioder. Bugdøy kom tilsvarende ut med flest perioder, og også de lengste.

Det kan diskuteres hvilke kriterier som skal legges til grunn for en rangering av lokalitetene i forhold til vannstrømmen nær bunn som er blitt målt. Om en tar utgangspunkt i midlere styrke på vannstrømmen, og ser begge måledyp under ett, kommer Kaldvika best ut, og Breivika dårligst (jamfør med tabell 3.1). Kaldvika hadde også et tydelig strømskjær ved bunn, d.v.s. hyppig motsatt strømretning i de to måledypene, noe som er gunstig for blanding og fortykning av evt. forurensing i vannmassene.

Vi vil imidlertid legge vekt på varighetsanalysen, i det hyppig forekomst av lengere perioder med tilnærmet stagnant vann vil være minst gunstig for blanding/fortynning. Breivika framtrer dermed som gunstigst, med Kaldvika og Bugdøy rangert deretter.

## **4.5. Slutt kommentarer og konklusjoner**

Konklusjonene basert på målinger av vannstrøm lokalt og modellering (beregning) av klorkonsentrasjoner viser at det er tale om små områder (influensområder) der klorkonsentrasjonen kan komme til å overstige 0,01 mg/l i sjøvannet over elektrodene. Det dreier seg om et tynt vannsjikt nær bunn (inntil 2 m tykt) over elektrodene og som strekker seg maksimalt 5 meter utenfor elektrodearealet. I praksis kan en derfor si at det kun er like over selve elektrodene at klorkonsentrasjonen teoretisk kan overstige 0,01 mg/l.

### **4.5.1. Etterprøving**

Når anlegget er kommet i drift, bør det foretas nøyaktige målinger av temperatur-fordeling og klor-komponenter i sjøen over og rundt anlegget. Dette bør kombineres med målinger av vannstrøm som gir data for strømmen i tiden forut for og under målingene og prøvetakingen.

Andre og mer raffinerte modeller enn "CORMIX" for å beregne konsentrasjoner vil også kunne benyttes. En større gevinst på dette feltet vil imidlertid avhenge av at inn-parametrene angående bl.a. vannkjemi, halveringstid etc blir bedre.

Drift av de aktuelle sjøelektrodene gir en glimrende anledning til å undersøke samsvaret mellom gjennomførte forhåndsvurderinger og faktiske forhold gjennom kontrollmålinger. Nye måledata vil ha stor verdi for etterprøvingen av de teoretiske beregningene og forhåndsutredningene som er utført, og vil danne en viktig kunnskapsbasis for framtidige vurderinger av tilsvarende elektrodeanlegg. Dette synspunktet deles også av Poléo og Harboe (pers. medd.).

## 5. LITTERATUR.

Aanderaa Instruments, 1983: Operating Manual. Technical Description No. 159, Aanderaa Instruments, Bergen.

Fogelqvist og Krysell 1986: The anthropogenic and biogenic origin of low molecular weight halocarbons in a polluted fjord, the Idefjorden. Mar. Poll. Bulletin, Vol. 17, No. 18, s. 378-382.

Keussen, 1994: Report on the investigations at the electrodes of the Fenno-Scan HVDC link. Konfidensiell rapport 1/94 fra Preussen Elektra AG, Hannover, Tyskland, 5 s.

Koops, F. B. J. 1996: Environmental aspects of Sea Electrodes for the NorNed Cable. Rapportkast, 24. juni 1996, KEMA Environmental Services, Arnhem, Nederland, 37 s.

Poléo, A. B. S. og M. Harboe 1996: Virkninger av likestrøms (HVDC) sjøkabler og elektrodeanlegg på marint liv. Konsekvensutredning for kabelprosjektene. Rapp. april 1996, Biol. Inst, UiO, 46 s.

STATNETT 1994 (Telstad et al.): Målinger av potensialstigning, klorinnhold i sjøvann og strømfordeling i elektrodeanlegget i Grosøysøyla. NOTAT, Statnett, 6 s.

Thommassen, J. (red.) 1992: MTBE anlegg Kårstø. Konsekvensutredninger for miljø, naturressurser og samfunn. Rapp. nr 142/92.

Tykeson, K., A. Nyman og H. Carlson 1996: Environmental and geographical aspects in HVdc electrode design. Manuskript, IEEE symposium 96 WM 115-6 PWDR, 7s.

US EPA 1986: Quality Criteria for Water, 1986. Rapp. PB87-226759. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, s. 76-78.

US EPA 1995: CORMIX. Users Manual, CEAM; Center for Exposure Assessment Modeling Customers, USA, ca 50 s.

# Appendiks 1

## English Summary.

The Norwegian electricity company STATNETT is planning to establish two high-voltage sea cable connections between South Norway and Germany, and one connection between Norway and the Netherlands. The installations will be organized through the projects Viking Cable, EuroKabel and NorNed Kabel. Single-pole cables will be laid on the sea-bed. Return current will be carried by the seawater and by conductive layers of the earth. Sea electrodes will be installed on the sea-bed nearshore. On the Norwegian side, locations near Farsund and Flekkefjord are being considered.

The sea electrodes will intermittently or continuously be operated as anodes. When the electrodes are serving as anodes, some chlorine ( $Cl_2$ ) gas will develop as a result of electrolysis of the seawater. The amount of gas produced, will depend on factors such as the magnitude of the electric current and type of electrode. For the proposed installations the maximum electric current will be 1600 A.

On the Norwegian coast two or possibly three graphite electrodes will be installed. Two electrodes may be installed in parallel at the same location, with a total current of 3200 A. Each installation will have an effective electrode area of approximately  $400 \text{ m}^2$ , evenly distributed over a bottom area of about  $100 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ .

Three sites for mounting the sea electrodes have been selected for further evaluation:

**Breivika** in Hidasundet, near Flekkefjord,  
The east side of **Bugdøy** near Farsund,  
**Kaldvika** in Rosfjorden, east of Farsund.

When the electrodes are driven as anodes, some chlorine gas ( $Cl_2$ ) will be produced due to electrolysis of seawater. With the proposed electrode type and at a current of 1600 A a maximum of 600 mg chlorine gas can be produced per second at the anode. Chlorine gas or the chemical components derived when the gas rapidly converts in seawater may be toxic to marine organisms if concentrations become too high.

STATNETT contacted NIVA to calculate the expected concentrations of chlorine or derived constituents in the vicinity of the electrodes when they are operated as anodes. STATNETT also wanted to know the size of the area that would have a negative environmental impact, given the assumption that ambient concentrations below  $0.01 \text{ mg } Cl_2/l$  are acceptably safe.

Little information exists on actually measured chlorine concentrations in seawater around sea electrodes or at discharge sites for e.g. chlorinated cooling water. As a basis for the present evaluation assessment mostly results from previous theoretical assessments on chemical processes at sea electrodes have been used. In addition, field data on water currents and hydrography were continuously and simultaneously sampled by NIVA on the three sites during one month, 19 March - 18 April 1996. Water currents were measured every 10 minutes by automatic recorders at depths corresponding to 2 m and 6 m above the sea bottom. Each recorder thus collected about 4500 individual measurements.

The following Table shows some results from the measurements of water current. Generally, the water currents were weakest nearest to the bottom. The mean values for current speed were within

the range 1.2 - 2.5 cm/s. At times the water currents were significantly below these values. The dominating direction of the water current (i.e. direction of the residual current) was towards E-SE at Bugdøy, E-NE at Kaldvika and W-SW at Breivika. All locations showed relatively high directional stability, with little flow reversal due to influence from the regular semi-diurnal tide.

Results from the 1 month of current measurements 2 and 6 m above the bottom, 19 Mar. - 18 April 1996:

<b>Location</b>	<b>Depth of measur. (m.a.b.)</b>	<b>Mean current speed (cm/s)</b>	<b>Direction of Domin. curr. (°), dir.</b>	<b>%-value of observ. &lt; 1.5 cm/s</b>
<b>Bugdøy</b>	6	1.57	86 (E)	88
<b>Bugdøy</b>	2	1.38	155 (SE)	82
<b>Kaldvika</b>	6	2.46	91 (E)	35
<b>Kaldvika</b>	2	1.22	44 (NE)	92
<b>Breivika</b>	6	1.51	236 (SW)	78
<b>Breivika</b>	2	1.37	288 (W)	80

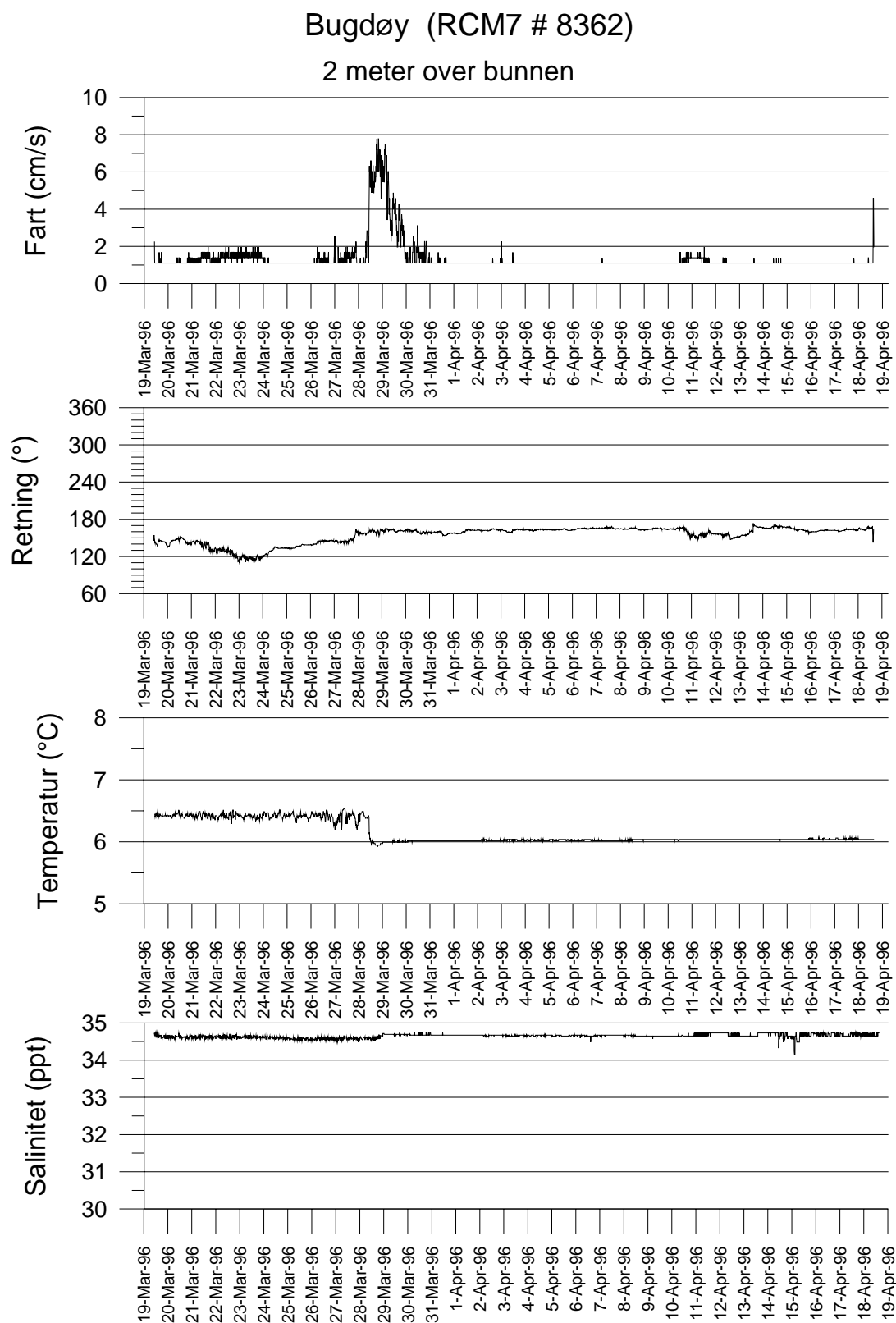
Based on the above results data model computations on expected chlorine concentrations above and downstream of the anode have been performed. The computations were based on diffusive leakage of chlorine from a horizontal electrode (anode) on the sea bottom into the overlying seawater. The chlorine is then carried away and dispersed by the water current in a thin water layer close to the bottom.

The model computations will highly depend on the decay rate of chlorine and its derived components, mainly hypochlorite. This will depend on factors such as water temperature and the concentration of dissolved organic material in the ambient seawater. Decay rates given in the literature vary somewhat according to this, but typically lie in the range 10 - 30 minutes. We selected 20 minutes as a 'realistic' value.

The results show that for realistic input values to the model, a concentration of 0.01 mg chlorine or derived components per liter of sea water may be exceeded in a 2-3 m thick bottom layer, extending maximum 5 m downstream from the electrodes. This corresponds to a theoretical area of negative influence of 200 m x 5 m outside of the electrode area proper.

These computations are based on relatively conservative or pessimistic estimates for input values and processes that affect the results. The production rate of chlorine and its derived components is an essential factor. Realistically this will be significantly lower than the theoretical maximum, due to the fact that also some oxygen will be produced instead of chlorine. The result for the calculated influence area given above is based on an assumption of 50% chlorine production relative to the theoretical maximum.

## Appendiks 2, figurer av måleresultatene

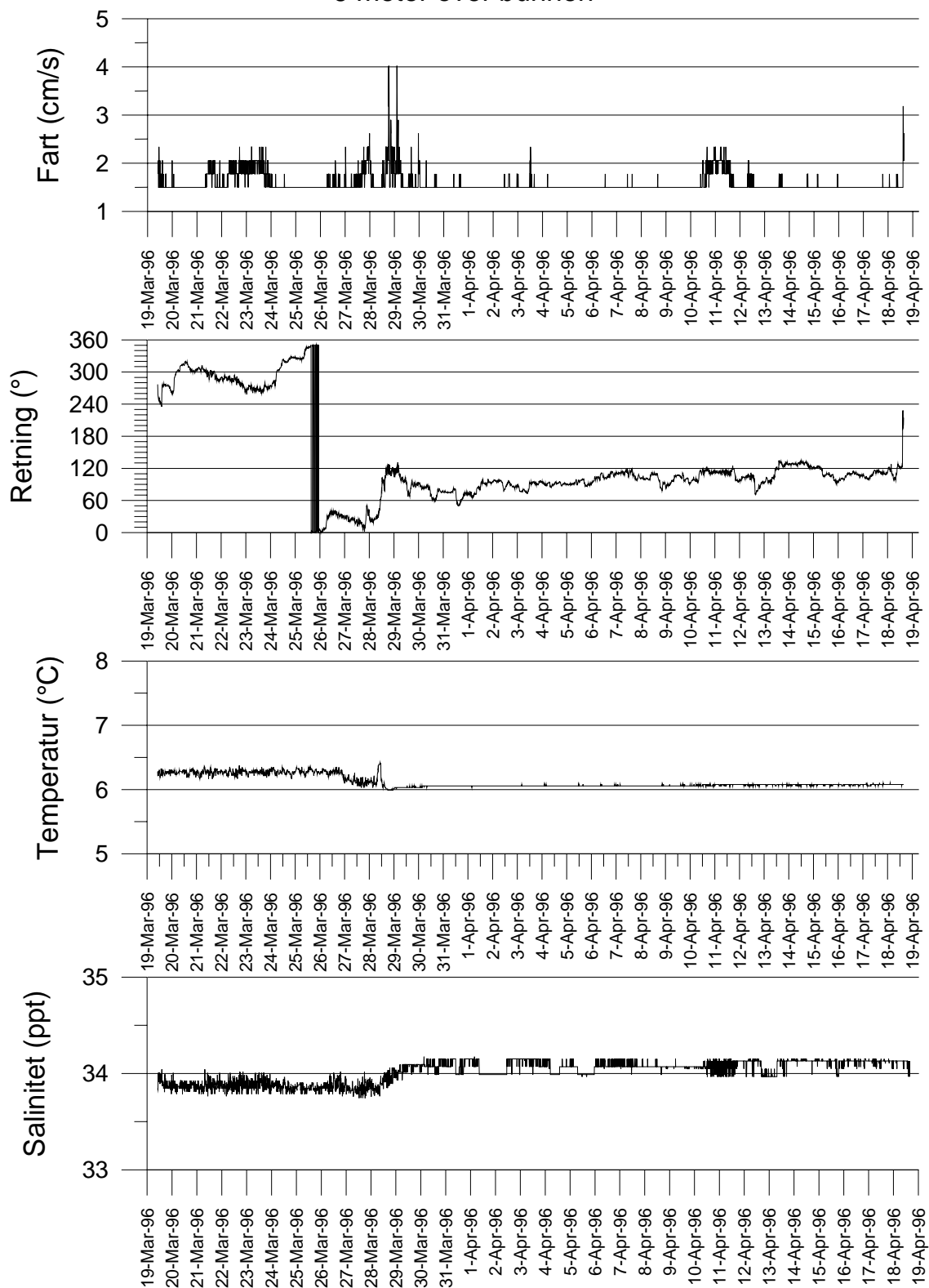


Figur A1. Tidsserieplott av strømmålingene gjort 2 meter over bunn ved Bugdøy.



# Bugdøy (RCM7 # 2608)

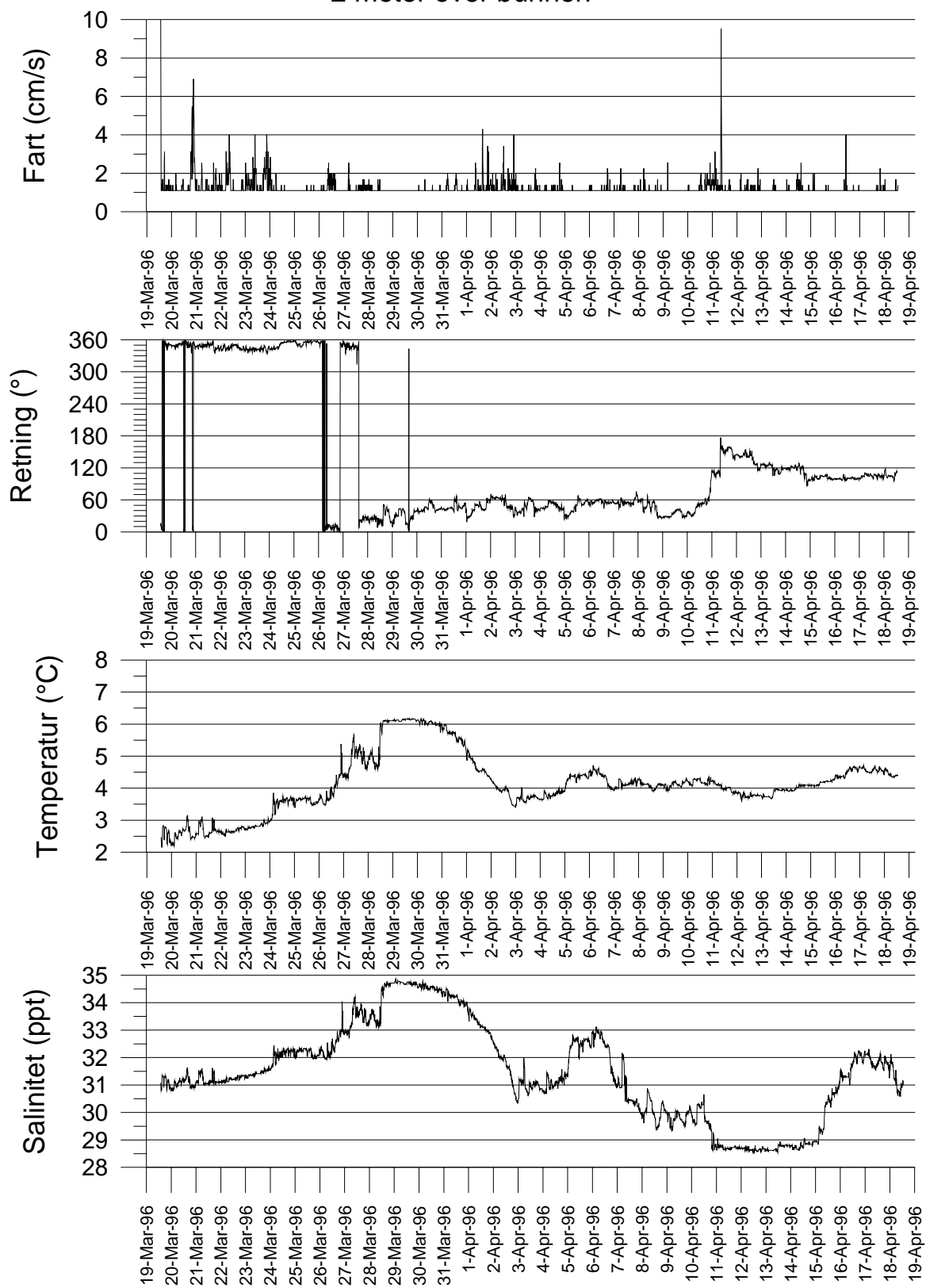
6 meter over bunnen



Figur A2. Tidsserieplott av strømmålingene gjort 6 meter over bunn ved Bugdøy

# Rossfjorden, Kaldvika (RCM7 # 4772)

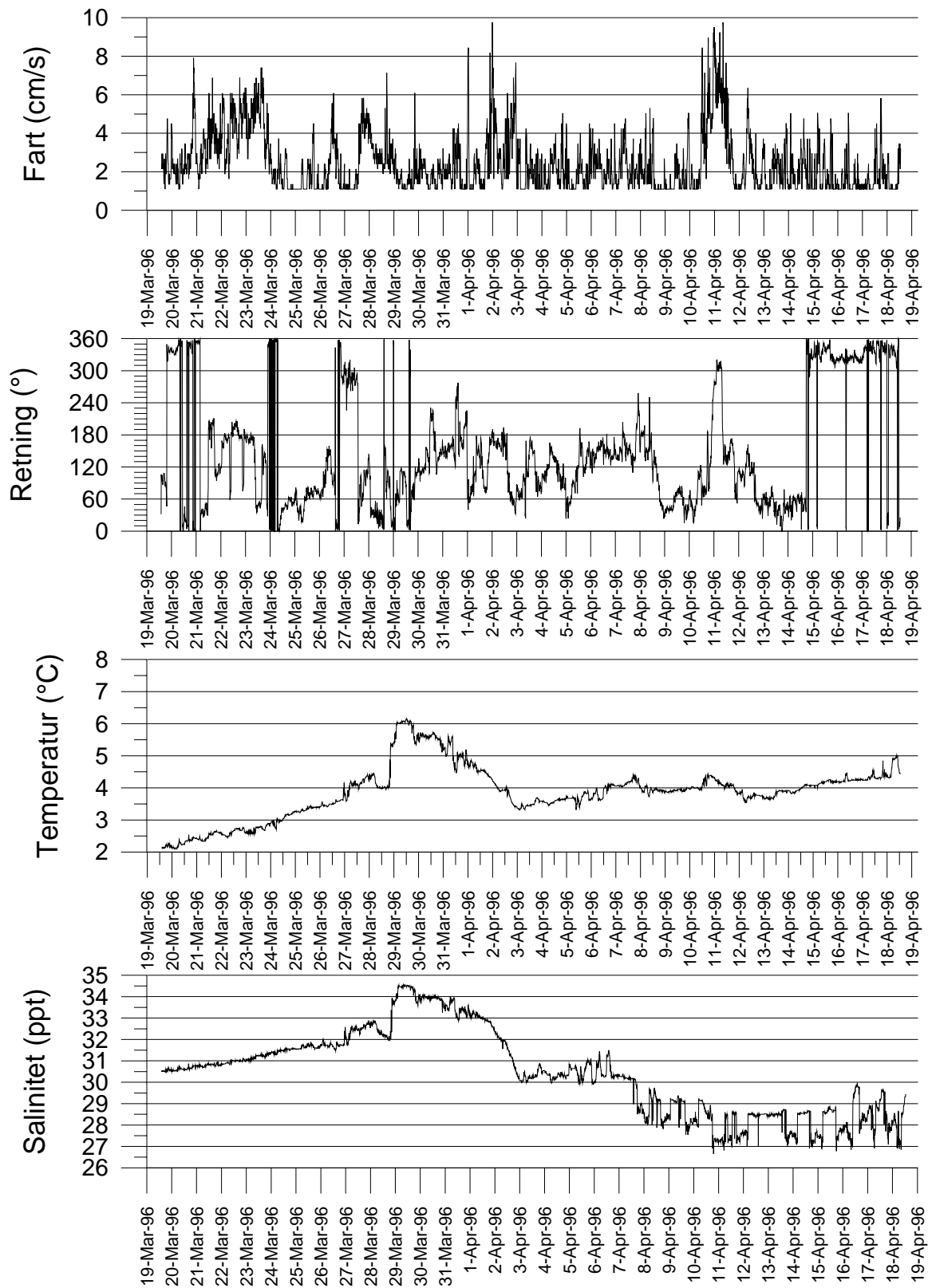
2 meter over bunnen



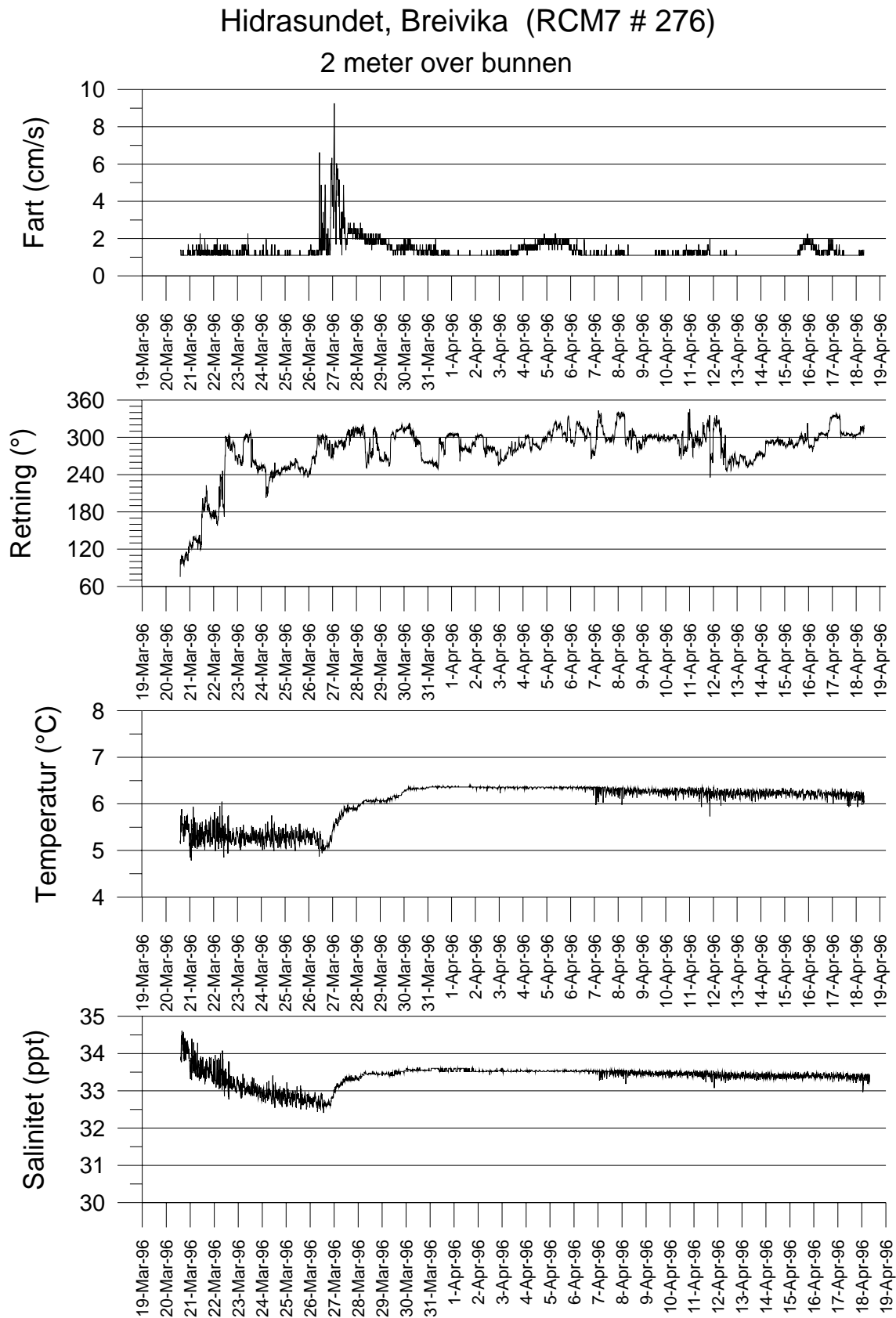
Figur A3. Tidsserieplott av strømmålingene gjort 2 meter over bunnen i Rossfjorden.

# Rossfjorden, Kaldvika (RCM7 # 11327)

6 meter over bunnen



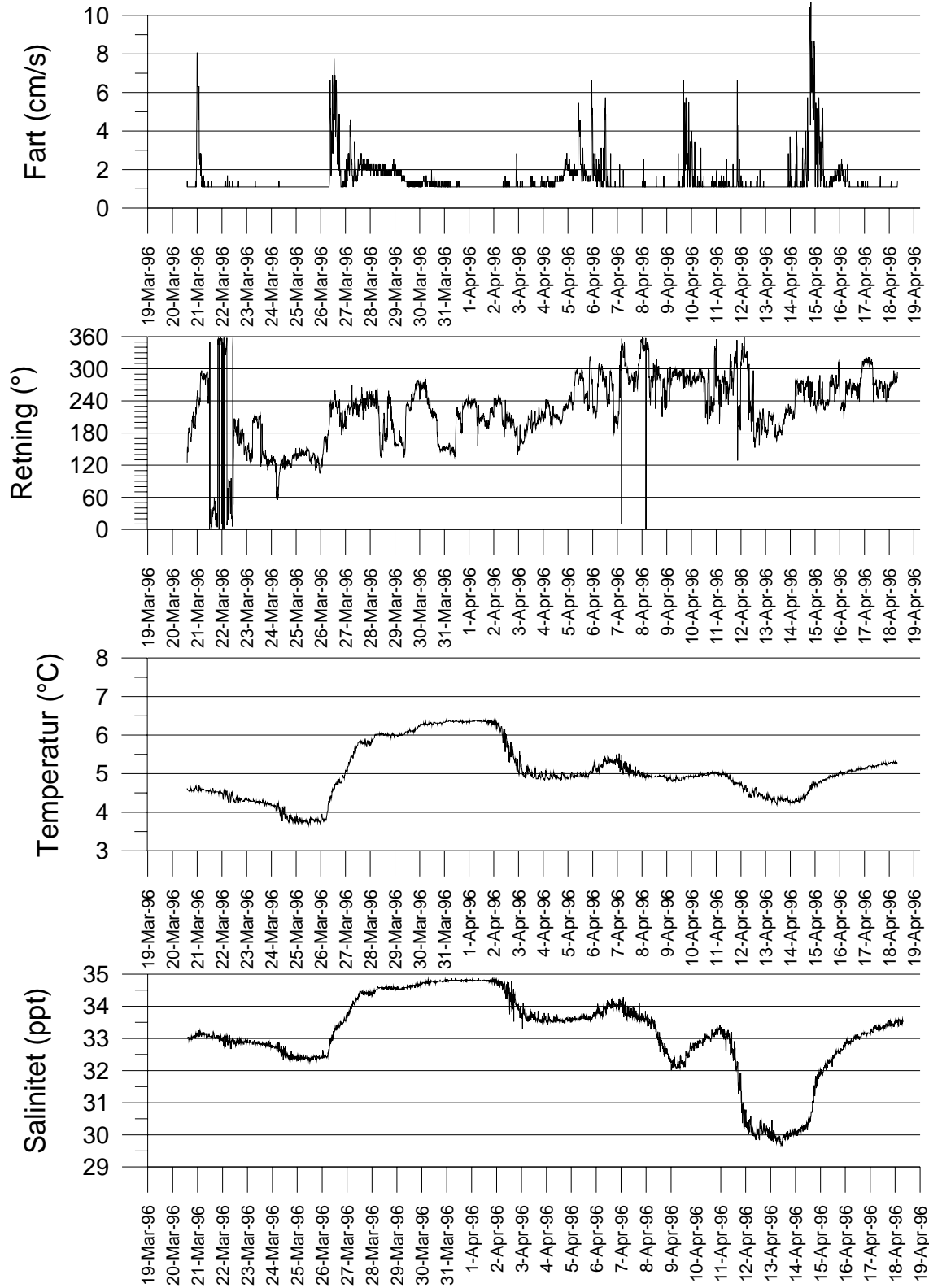
**Figur A4.** Tidsserieplott av strømmålingene gjort 6 meter over bunnen i Rossfjorden.



**Figur A5.** Tidsserieplott av strømmålingene gjort 2 meter over bunn i Breivika i Hidrasundet.

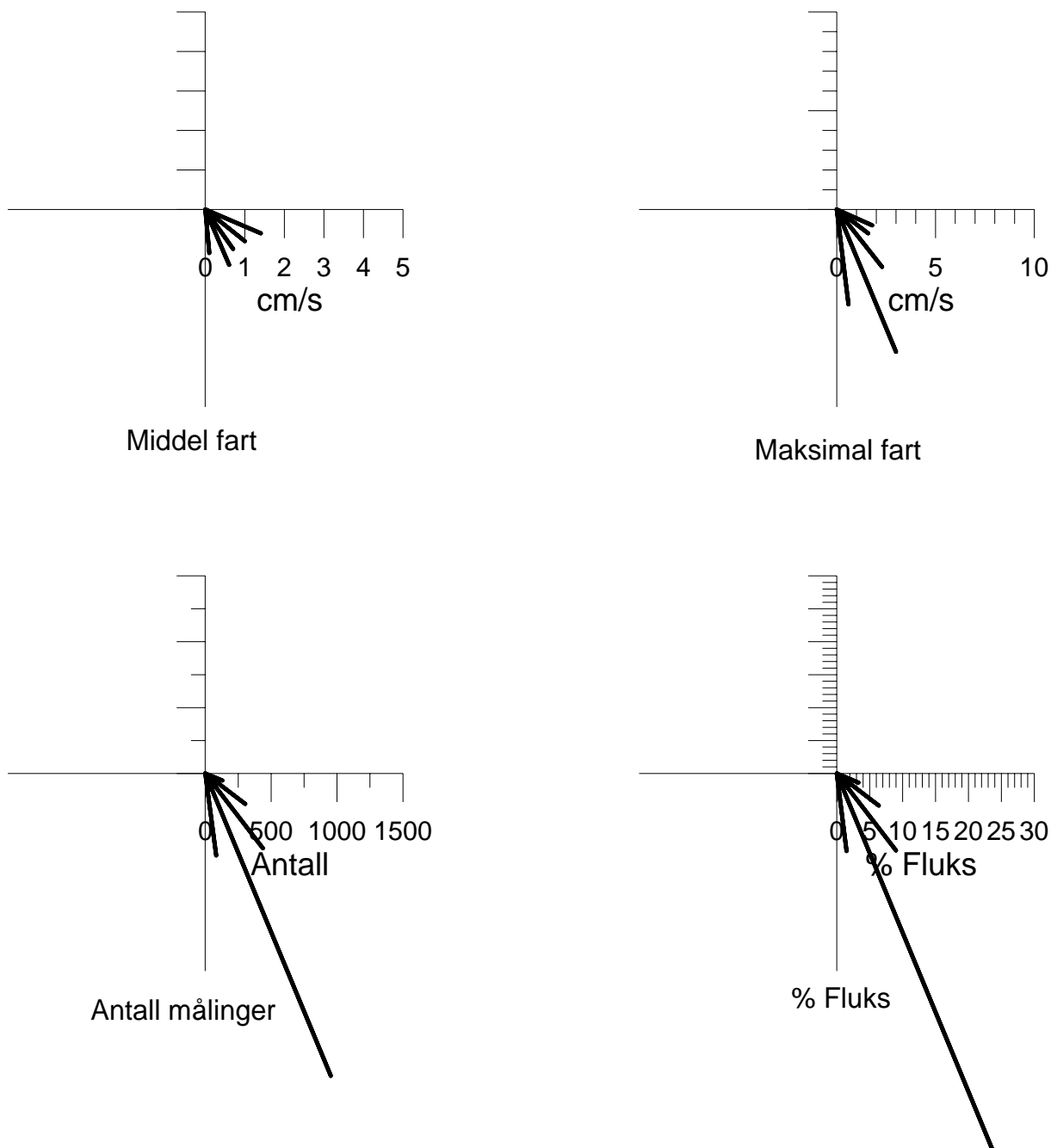
# Hidrasundet, Breivika (RCM7 # 9704)

6 meter over bunnen



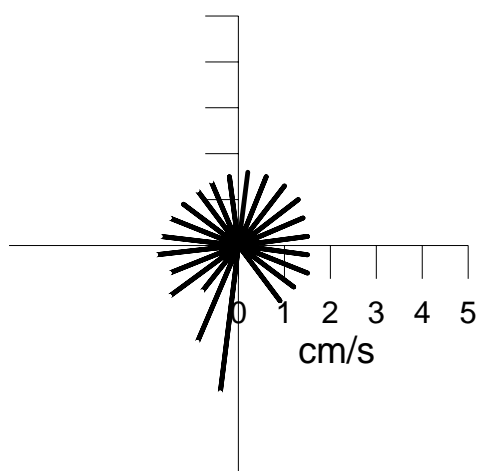
**Figur A6.** Tidsserieplott av strømmålingene gjort 6 meter over bunn i Breivika i Hidrasundet.

Serie: RCM7 # 8362

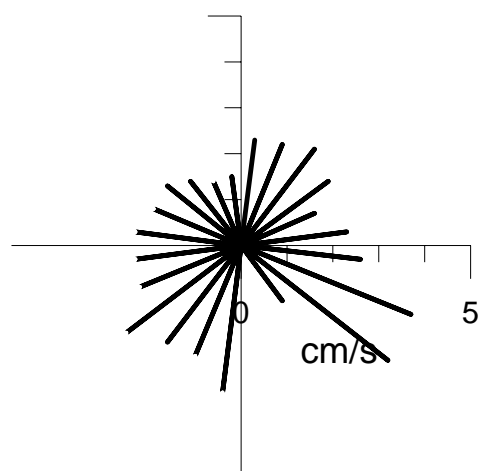


**Figur A7.** Strømrose fra strømmålingene gjort 2 meter over bunn ved Bugdøy.

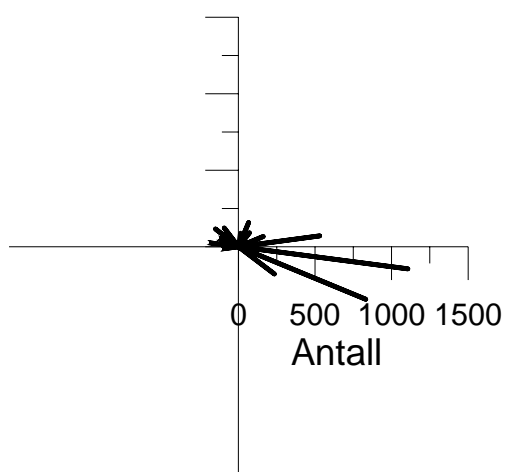
Serie: RCM7 # 2608



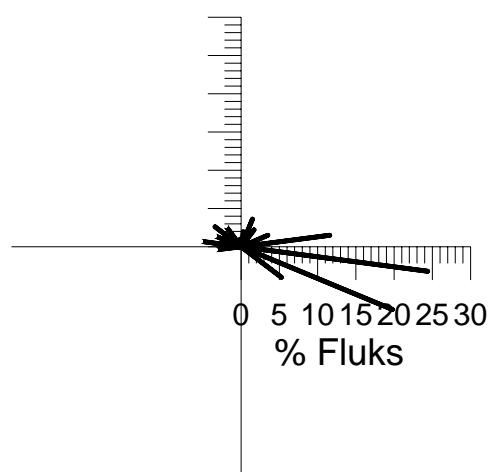
Middel fart



Maksimal fart



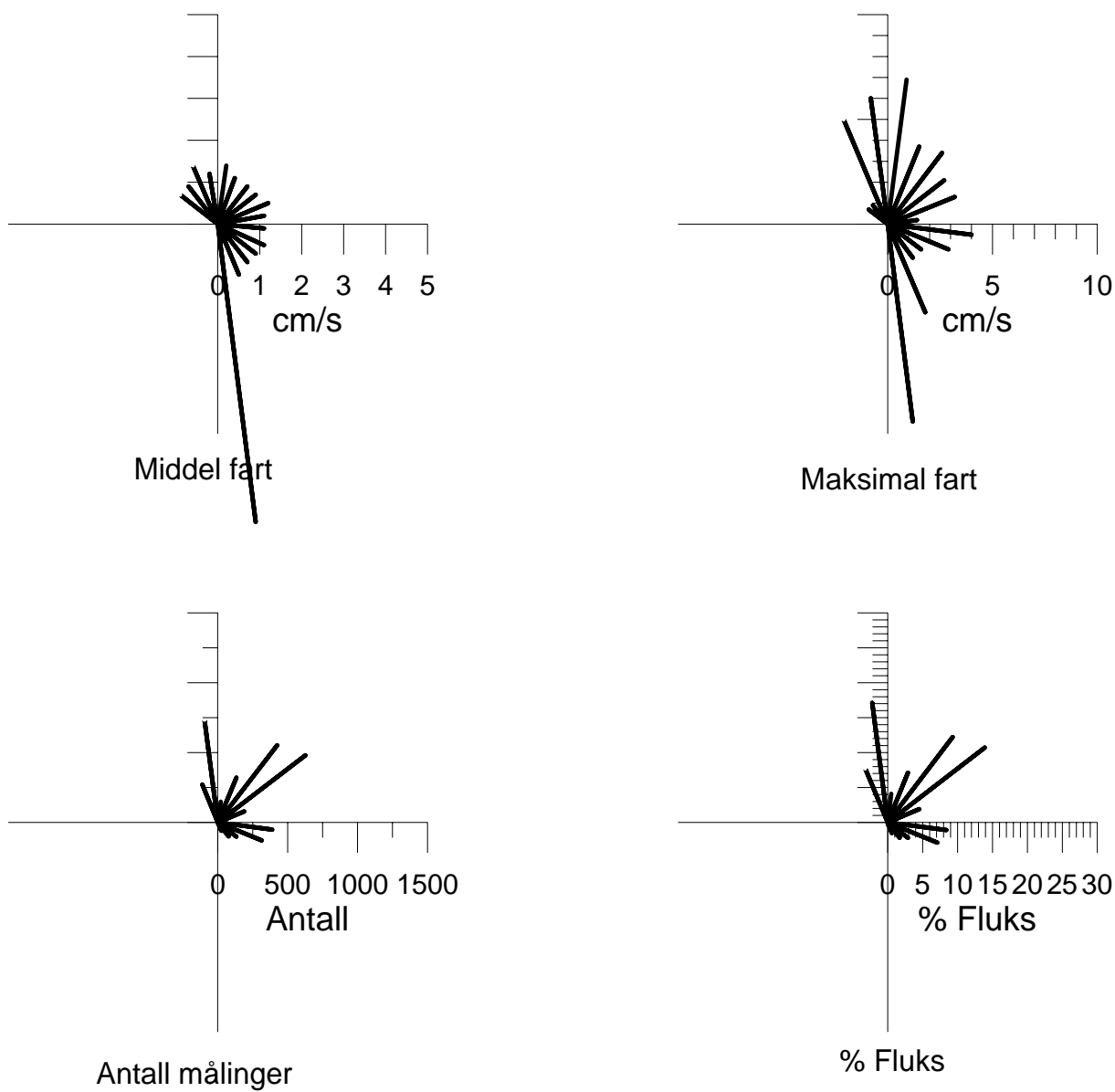
Antall målinger



% Fluks

**Figur A8.** Strømrose fra strømmålingene gjort 6 meter over bunn ved Bugdøy.

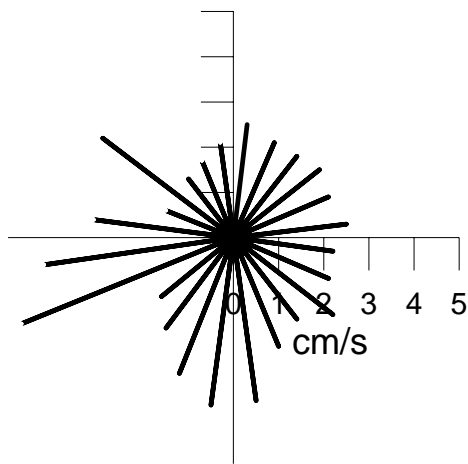
Serie: RCM7 # 4772



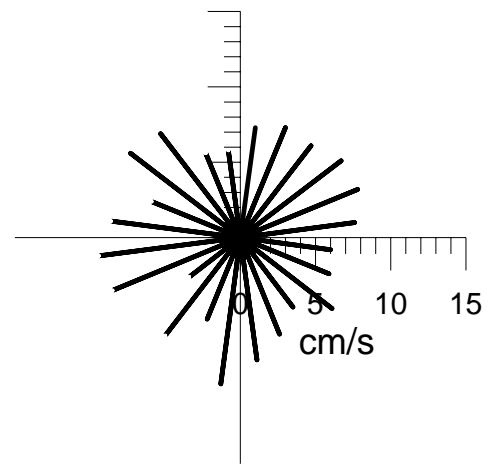
**Figur A9.** Strømrose fra strømmålingene gjort 2 meter over bunn i Rossfjorden.



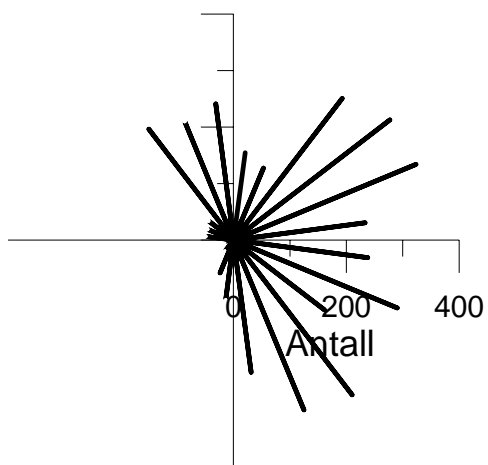
Serie: RCM7 # 11327



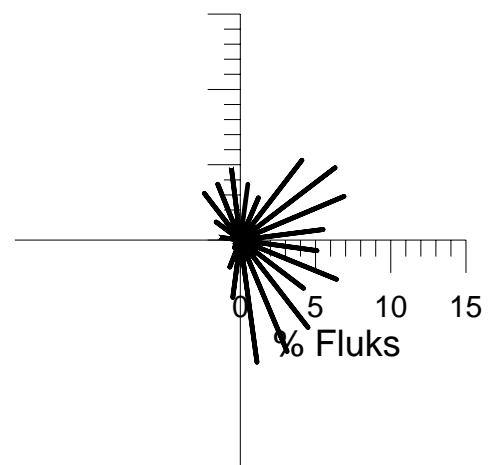
Middel fart



Maksimal fart



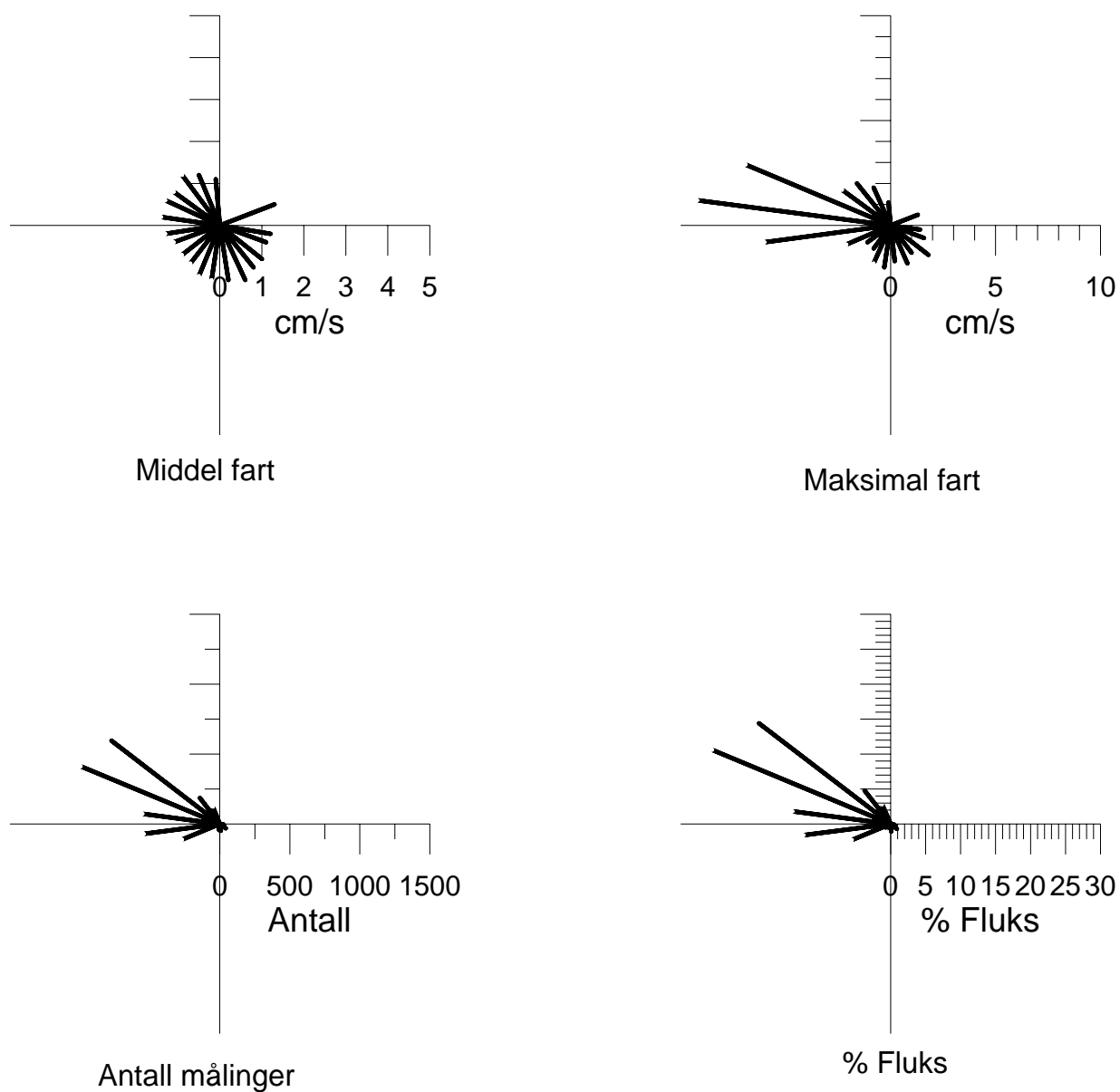
Antall målinger



% Fluks

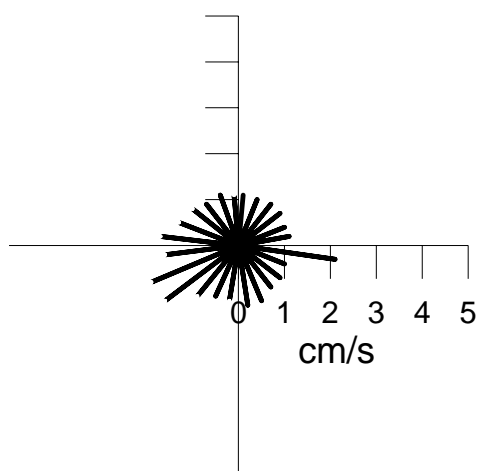
**Figur A10.** Strømrose fra strømmålingene gjort 6 meter over bunn i Rossfjorden.

Serie: RCM7 # 276

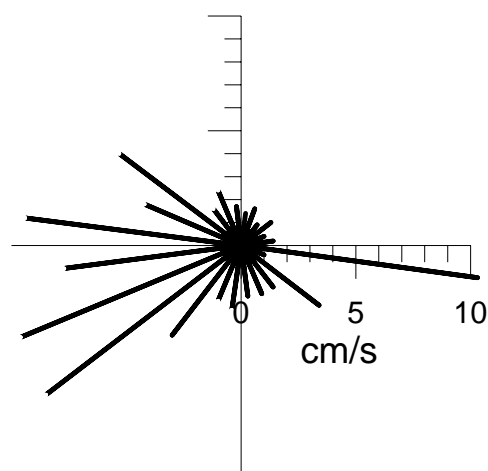


**Figur A11.** Strømrose fra strømmålingene gjort 2 meter over bunn i Breivika i Hidrasundet.

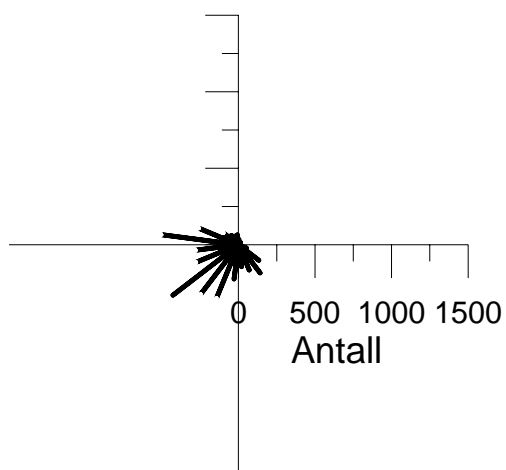
Serie: RCM7 # 9704



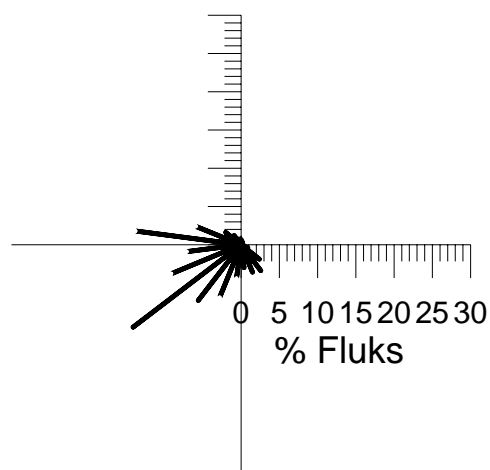
Middel fart



Maksimal fart

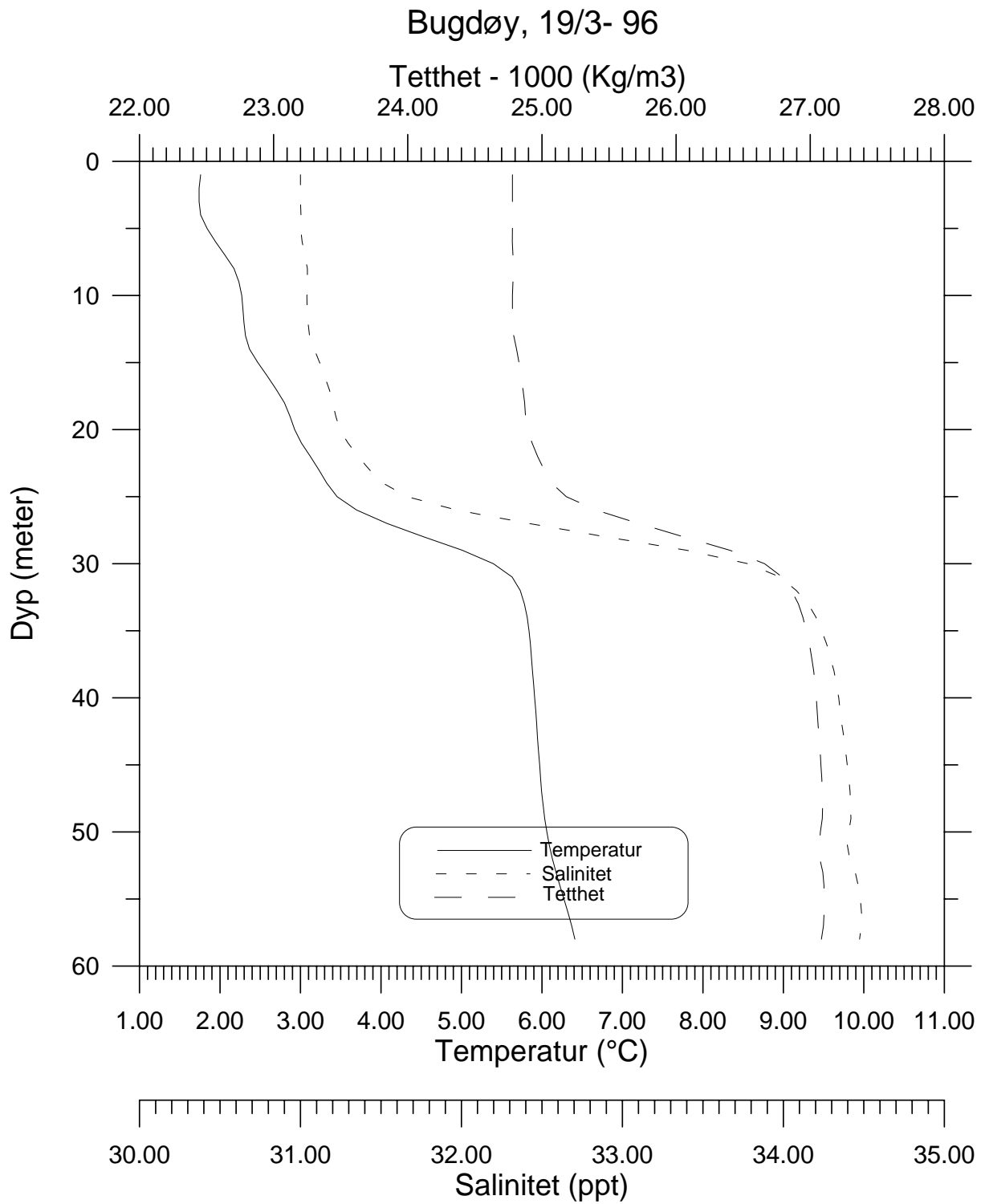


Antall målinger



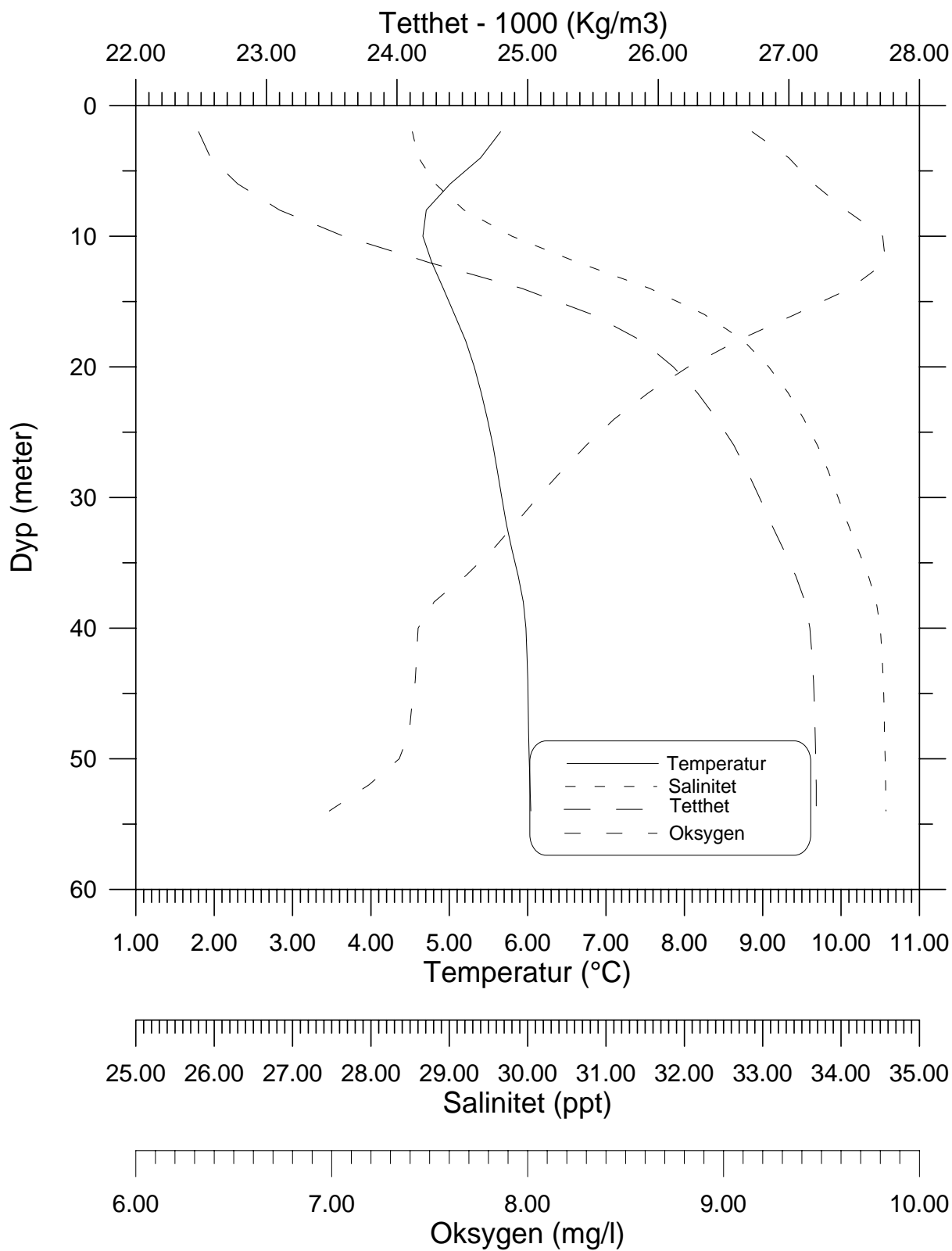
% Fluks

**Figur A12.** Strømrose fra strømmålingene gjort 6 meter over bunn i Breivika i Hidrasundet.

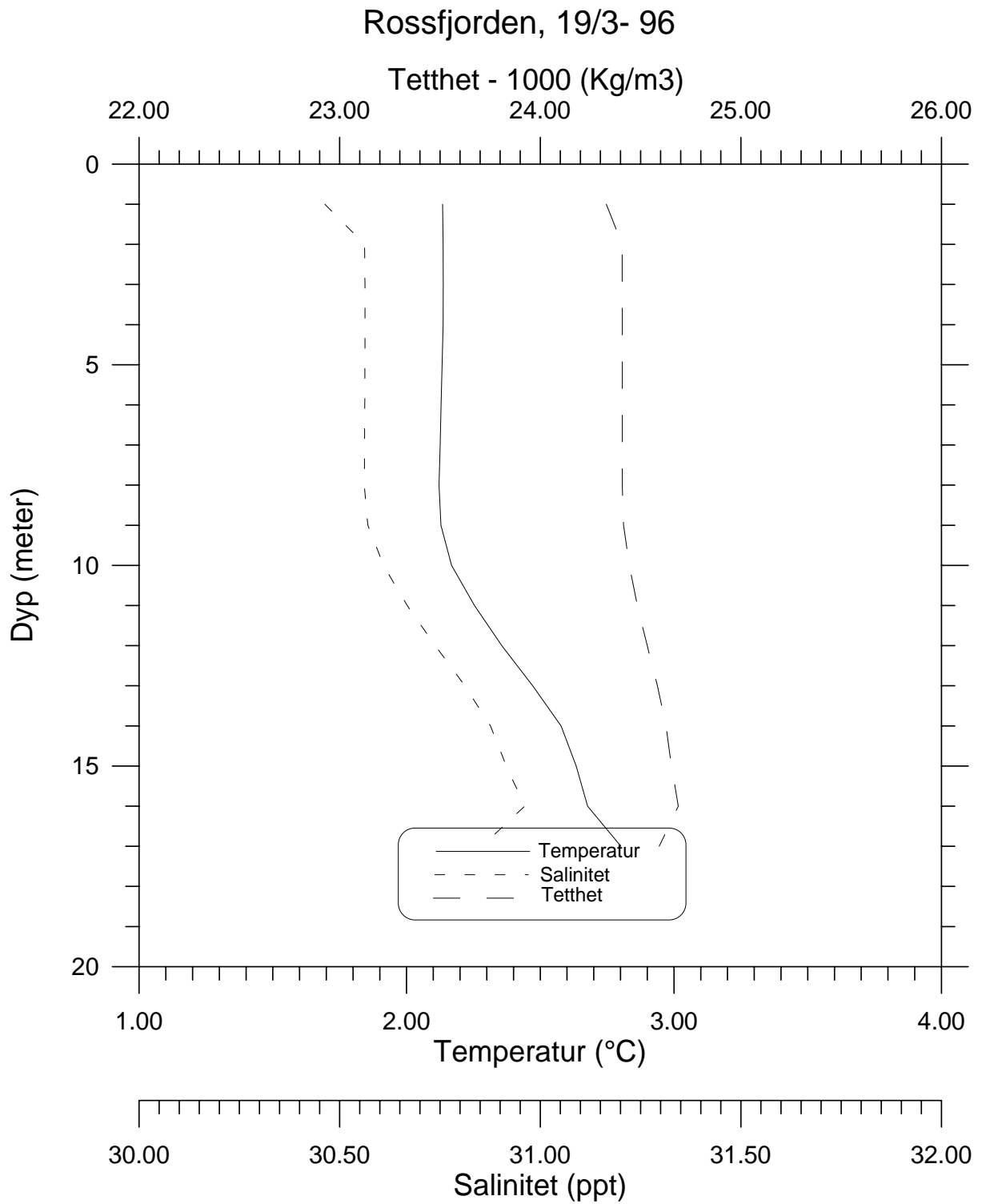


**Figur A13.** Hydrografimålinger ved Bugdøy den 19/3 -1996.

# Bugdøy, 18/4- 96

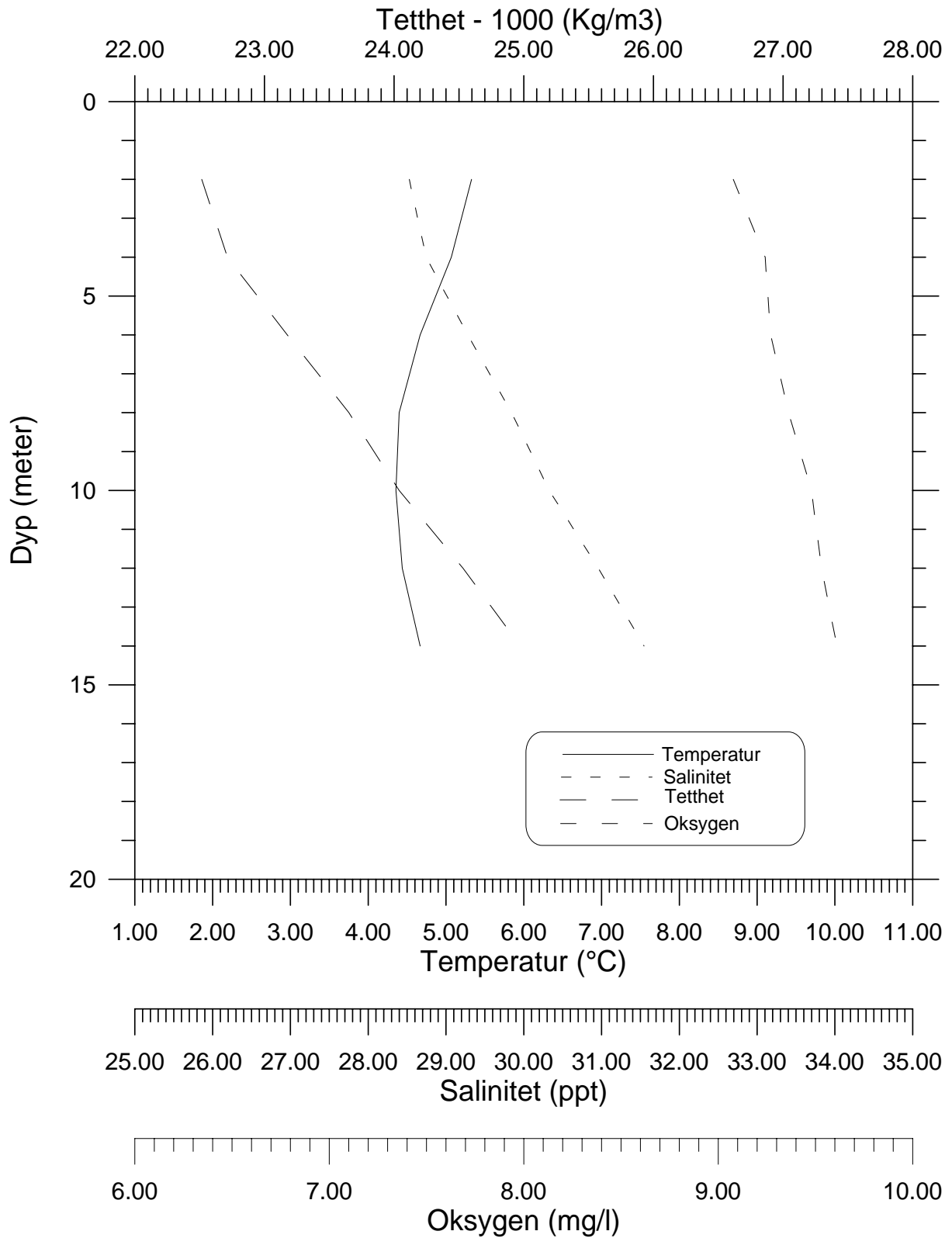


**Figur A14.** Hydrografimålinger ved Bugdøy den 18/4 -1996

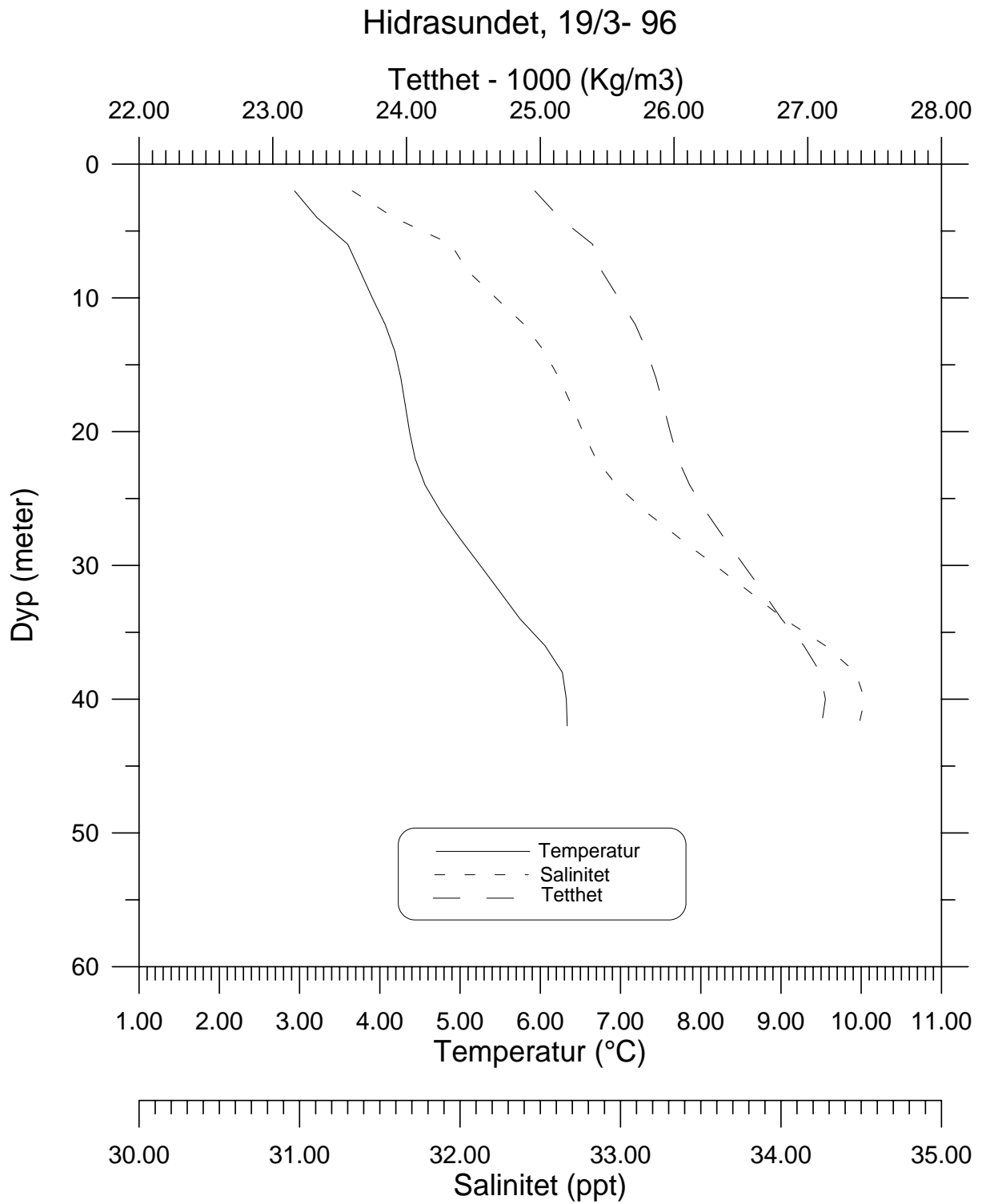


**Figur A15.** Hydrografimålinger fra Rossfjorden den 19/3 -1996.

# Rossfjorden, 18/4- 96

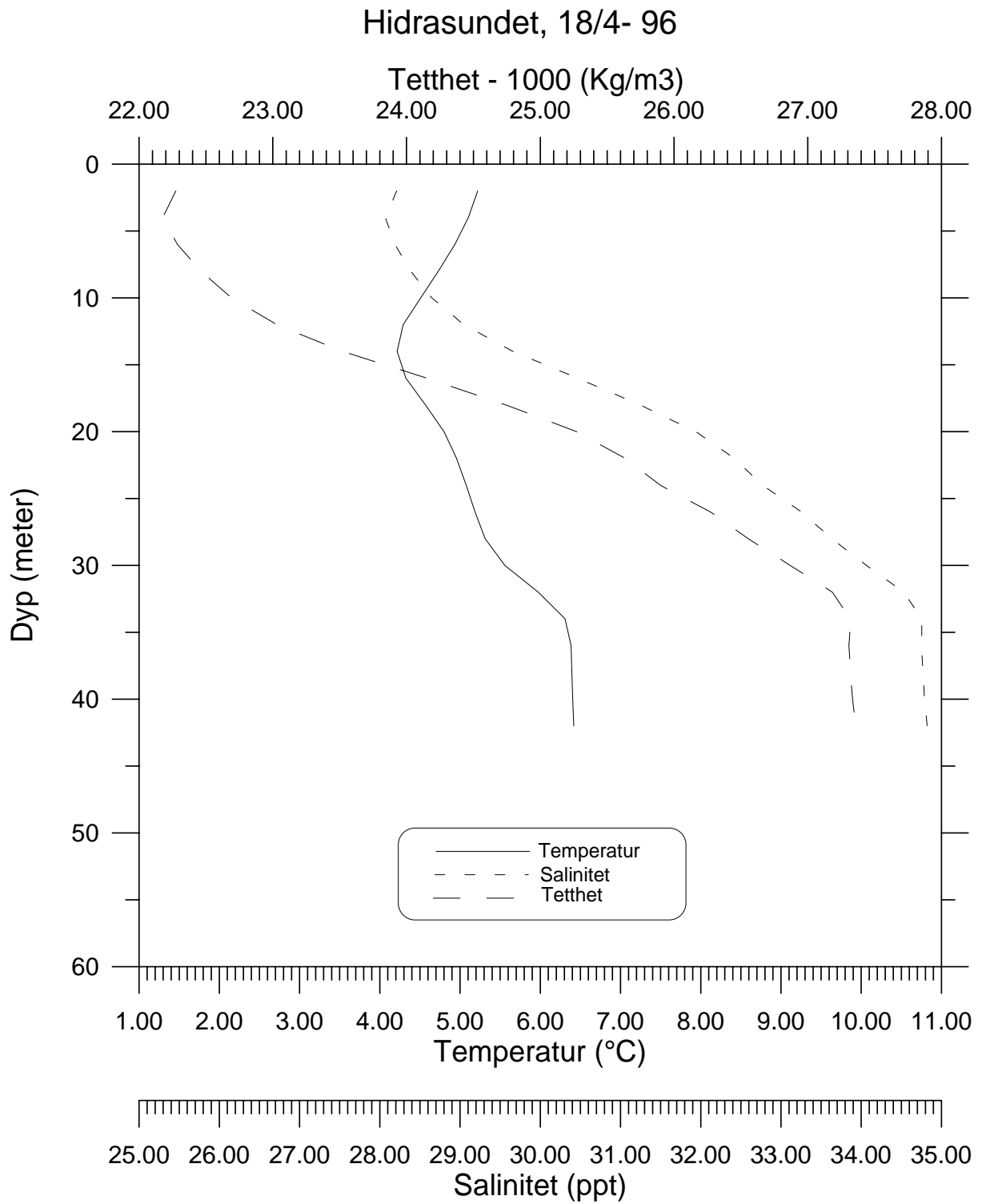


**Figur A16.** Hydrografimålinger fra Rossfjorden 18/4 -1996



**Figur A17.** Hydrografimålinger fra Breivika i Hidrasundet den 20/3 -1996.





**Figur A18.** Hydrografimålinger fra Breivika i Hidrasundet den 18/4 -1996.