

Polarfrontens fysiske beskaffenhet og biologiske implikasjoner

– en verdi- og sårbarhetsvurdering av polarfronten i Barentshavet

Vidar S. Lien (red.)



Prosjektrapport

Rapport:
FISKEN OG HAVET

Nr. – År:
8–2018

Dato:
25.09.2018

Tittel:
Polarfrontens fysiske beskaffenhet og biologiske implikasjoner
– en verdi- og sårbarhetsvurdering av polarfronten i Barentshavet

Forfattere:
Vidar S. Lien (red.)

Distribusjon: Åpen

Havforskningsprosjektnr.:
15166

Oppdragsgiver(e):
Faglig forum

Program:
Barentshavet

Forskningsgruppe:
Oseanografi og klima

Antall sider totalt:
75

Sammendrag:

Polarfronten er definert som skillet i Barentshavet mellom relativt varme og salte vannmasser av atlantisk opprinnelse og kaldere og ferskere vannmasser av arktisk opprinnelse. På grunn av de fysiske særtrekkene og implikasjonene for biologisk aktivitet, er dette området identifisert som et særlig verdifullt og sårbart område i forvaltningsplanen for Barentshavet og Lofoten. I denne rapporten oppsummeres frontens fysiske egenskaper, og dens variasjon i tid og rom. I tillegg oppsummeres den biologiske aktiviteten i polarfrontområdet og dets verdi og sårbarhet. Samlet sett er frontsystemet som vanligvis omtales under samlebetegnelsen polarfronten et viktig område for ulike arter på ulike trofiske nivå til ulike tider på året. Om vinteren utgjør polarfronten overvintrings- og gyteområde for ulike fiskearter. Området generelt, og Spitsbergenbanken spesielt, et område med høy biologisk aktivitet gjennom høy primærproduksjon om våren, og er derfor også et viktig beiteområde for sjøfugl. Utover sommeren utgjør hele området også en del av beiteområdene for fisk. Videre, har både sel og hval beitevandring i området om sommeren, men uten at man kan dokumentere store opphopninger over tid.

Emneord:

1. Barentshavet
2. Polarfronten
3. Verdivurdering
4. Sårbarhetsvurdering
5. Forvaltningsplan Barentshavet og Lofoten

Børge Holte, prosjektleder

Jan Erik Stiansen, faggrupeleder





**Polarfrontens fysiske beskaffenhet og biologiske implikasjoner
En verdi- og sårbarhetsvurdering av polarfronten i Barentshavet**

Redaktør: Vidar S. Lien

Oversikt over forfattere (alfabetisk)

Institusjon	Navn
Norsk Polarinstitut	Philipp Assmy
Havforskningsinstituttet	Bjarte Bogstad
Havforskningsinstituttet	Melissa Chierici
Havforskningsinstituttet	Kenneth F. Drinkwater
Norsk Polarinstitut	Pedro Duarte
Havforskningsinstituttet	Harald Gjøsæter
Norsk Polarinstitut	Haakon Hop
PINRO	Viktor Ivshin
Havforskningsinstituttet	Lis Lindal Jørgensen
Havforskningsinstituttet	Vidar S. Lien
Havforskningsinstituttet	Harald Loeng
Norsk Polarinstitut	Christian Lydersen
Havforskningsinstituttet	Margaret M. McBride
Havforskningsinstituttet	Lene Buhl-Mortensen
Havforskningsinstituttet	Pål Buhl-Mortensen
Norsk Polarinstitut	Ida Kessel Nordgård
Havforskningsinstituttet	Hein Rune Skjoldal
Norsk Polarinstitut	Hallvard Strøm
Norsk Polarinstitut	Arild Sundfjord
Norsk Polarinstitut	Cecilie H. von Quillfeldt
Norsk Polarinstitut	Dag Vongraven

Sammendrag

Polarfronten er definert som skillet i Barentshavet mellom relativt varme og salte vannmasser av atlantisk opprinnelse og kaldere og ferskere vannmasser av arktisk opprinnelse. Denne fronten er spesielt tydelig rundt Spitsbergenbanken og Hopen-dypet, men også videre rundt Sentralbanken og til dels også østover i Barentshavet. På grunn av de fysiske særtrekkene og implikasjonene for biologisk aktivitet, er dette området identifisert som et særlig verdifullt og sårbart område. I denne rapporten oppsummeres frontens fysiske egenskaper, og dens variasjon i tid og rom. I tillegg oppsummeres den biologiske aktiviteten i polarfrontområdet og dets verdi og sårbarhet.

Rapporten gir en mer detaljert oversikt over strukturen i polarfronten enn hva som er gitt i tidligere oppsummeringer, og peker på at det finnes tre fronter rundt Spitsbergenbanken og Hopen-dypet, som alle har ulik opprinnelse og struktur og derfor også ulik påvirkning på biologisk produksjon og aktivitet.

Høyt oppe på skråningen av Spitsbergenbanken (~50-100 m bunndyp) finner man en front som skyldes en kombinasjon av grunt bunndyp og sterke tidevannsstrømmer. Denne fronten er derfor tidligere kalt en tidevannsfront, men også en sommerfront, ettersom de hydrografiske forskjellene som definerer selve fronten stort sett bare er tilstede i sommerhalvåret, om enn selve drivkreftene som opprettholder fronten ligger fast. Denne fronten bidrar til å gjøre deler av Spitsbergenbanken til en "hotspot" mtp. biologisk produksjon. Ettersom denne fronten er bestemt av bunndypet og tidevannsstrømmene, er den forutsigbar og relativt enkel å kartfeste.

Den egentlige polarfronten, som skiller arktisk vann fra atlantisk vann, er typisk lokalisert langs ~200 m isobaten rundt hele Hopen-dypet, og om sommeren identifiserbar fra ca. 50 meters dyp og ned mot bunnen. Denne fronten er dynamisk sett «passiv» og bidrar derfor ikke til forhøyet primærproduksjon. Polarfronten fungerer imidlertid som habitatgrense for en del arter, og den kan også fungere som et aggregeringsområde for ulike arter. Den er nært knyttet til topografi og derfor relativt enkel å kartfeste, og den er tilstede hele året med relativt små variasjoner både gjennom året og mellom år.

I tillegg til de to ovennevnte frontene, finnes det en smeltevannsfront i overflatelaget som er tilstede om våren og sommeren. Denne fronten er typisk ikke mer enn 50 m dyp og den kan være koblet sammen med polarfronten, men er det ikke nødvendigvis. Denne fronten er mer flyktig og derfor vanskeligere å kartfeste på generell basis, ettersom den avhenger av smeltingen av sjøis og dermed foregående vinters isdekke. I likhet med tidevannsfronten er også denne fronten viktig for dynamikken i våroppblomstringen, med påfølgende kaskadeeffekter oppover i næringskjeden.

Samlet sett er frontsystemet som vanligvis omtales under samlebetegnelsen polarfronten et viktig område for ulike arter på ulike trofiske nivå til ulike tider på året. Om vinteren utgjør polarfronten overvintrings- og gyteområde for ulike fiskearter. Området generelt, og Spitsbergenbanken spesielt, et område med høy biologisk aktivitet gjennom høy primærproduksjon om våren, og er derfor også et viktig beiteområde for sjøfugl. Utover sommeren utgjør hele området også en del av beiteområdene for fisk. Videre, har både sel og hval beitevandring i området om sommeren, men uten at man kan dokumentere store opphopninger over tid.

Innhold

Sammendrag	5
Innhold	6
2 Innledning	9
2.1 Bakgrunn og formål	9
2.2 Tilnærmingen til oppdraget og format på leveransen	9
<i>2.2.1 Geografisk avgrensing</i>	9
<i>2.2.2 Tilnærming til oppdraget</i>	9
<i>2.2.3 Format på leveransen</i>	10
<i>2.2.4 Polarfronten som verdifullt og sårbart område i forvaltningsplanen for Barentshavet</i>	10
<i>2.2.5 Relasjon til fagrapport på iskantsonen</i>	10
3 Tidligere undersøkelser	11
4 Topografi, sirkulasjon og vannmasser	12
5 Oseanografiske forhold	15
5.1 Oppsummering av tilgjengelig litteratur	15
<i>5.1.1 Fronten rundt Spitsbergenbanken</i>	15
<i>5.1.2 Årssyklus over Spitsbergenbanken</i>	18
<i>5.1.3 Fronten sør av Storbanken</i>	19
5.2 Nye analyser av de fysiske forhold i polarfronten	21
<i>5.2.1 Hydrografiske observasjoner</i>	21
<i>5.2.2 Numerisk modellering</i>	23
5.3 Fremtidige endringer i polarfronten, tidevannsfronten og smeltevannsfronten	26
5.4 Kunnskaps- og overvåkningsbehov	28
6 Næringssalter	29
6.1 Kunnskaps- og overvåkningsbehov	30
7 Primær og sekundærproduksjon	31
7.1 Planteplankton	31

7.2 Dyreplankton.....	32
7.3 Kunnskaps- og overvåkningsbehov	33
8 Fisk.....	34
8.1 Kunnskaps- og overvåkningsbehov	34
9 Bunnsamfunn.....	35
9.1 Kunnskaps- og overvåkningsbehov	39
10 Sjøfugl og sjøpattedyr	40
10.1 Kunnskaps- og overvåkningsbehov	41
11 Sårbarhet	42
11.1 Ytre påvirkning	42
11.1.1 Klimaendringer	42
11.1.2 Havforsuring	43
11.1.3 Miljøgifter	43
11.1.4 Plast.....	43
11.1.5 Fiskeri.....	44
11.1.6 Oljeutslipp fra skipstrafikk og petroleumsvirksomhet.....	45
11.2 Økosystemrespons.....	46
11.2.1 Endret produksjon	46
11.2.2 Endret føde kvalitet	46
11.2.3 Forflytning av arter og endrede konkurranseforhold	47
12 Vurdering av polarfrontens verdi for de marine økosystem	47
12.1 Næringssalter og Planteplankton	47
12.2 Dyreplankton.....	48
12.3 Fisk	48
12.3.1 Torsk.....	48
12.3.2 Lodde	49
12.3.3 Hyse	49
12.3.4 Snabeluer	51

<i>12.3.5 Blåkveite</i>	51
<i>12.3.6 Gapeflyndre</i>	52
<i>12.3.7 Andre arter</i>	52
12.4 Sjøfugl	52
<i>12.4.1 Havhest</i>	53
<i>12.4.2 Ismåke</i>	53
<i>12.4.3 Krykkje</i>	54
<i>12.4.4 Polarlomvi</i>	55
<i>12.4.5 Lomvi</i>	55
<i>12.4.6 Alkekonge</i>	55
12.5 Sjøpattedyr	56
<i>12.5.1 Grønlandssel</i>	56
<i>12.5.2 Vågehval</i>	56
<i>12.5.2 Finnhval og knølhval</i>	57
12.6 Bunnsamfunn og naturtyper	57
13 Kunnskaps- og overvåkningsbehov	58
14 Referanser	59
Appendix	67

2 Innledning

2.1 Bakgrunn og formål

I Meld.St. 20 (2014-2015) Oppdatering av forvaltningsplanen for Barentshavet og havområdene utenfor Lofoten med oppdatert beregning av iskantsonen er det oppgitt at behovet for å oppdatere avgrensningen av polarfronten som et særlig verdifullt og sårbart område vil bli vurdert i forbindelse med revidering av forvaltningsplanen i 2020. Derfor ba Faglig forum Havforskningsinstituttet (HI) og Norsk Polarinstitutt (NP) om å lage en fagutredning for både polarfronten og iskantsonen, med fokus på hvordan de særlig verdifulle og sårbare områdene ved polarfronten og iskantsonen kan avgrenses med begrunnelse i fysiske og biologiske egenskaper, inkludert hvordan disse varierer i tid og rom. Både de fysiske og biologiske forholdene skulle beskrives, samt hvordan disse varierer gjennom året og mellom år og hva som er viktige drivere for naturlige variasjoner kontra menneskeskapte. Det var imidlertid ikke en del av oppdraget å definere hvor grensene for disse verdifulle og sårbare områdene skal gå. Det ble besluttet at arbeidene med polarfronten og iskantsonen skulle gjennomføres parallelt og leveres i to separate rapporter. Rapporten om iskantsonen ble levert Faglig forum i 2017 (von Quillfeldt et al., 2017).

2.2 Tilnærmingen til oppdraget og format på leveransen

2.2.1 Geografisk avgrensning

Polarfronten strekker seg i prinsippet fra Framstredet i nordvest til området mellom Novaja Semlja og Franz Josef Land i nordøst. I rapporten er polarfronten beskrevet som skillet mellom atlantehavsvann og arktisk vann, og referanser til «polarfronten» i dette dokumentet peker tilbake på polarfronten som definert her, dvs. hvor skillet i vannmasser er lokalisert. Dersom det vises til polarfronten slik denne er definert i forvaltningsplanen for Barentshavet, så er dette nevnt eksplisitt. I hovedsak er det i rapporten et fokus på den norske delen av Barentshavet, fra Spitsbergenbanken i vest til Sentralbanken i øst. Imidlertid er det også gitt noe informasjon om polarfronten i deler av Barentshavet lenger øst som omfatter russisk økonomisk sone.

2.2.2 Tilnærming til oppdraget

I starten av arbeidet ble det bestemt å:

- Beskrive polarfrontens plassering og fysiske egenskaper i fortid, nåtid og fremtid basert på tilgjengelig litteratur og tilgjengelige observasjoner (fortid og nåtid), samt ved hjelp av numeriske havsirkulasjonsmodeller (fortid, nåtid og fremtid)
- Beskrive biologisk aktivitet, samt biologisk verdi og sårbarhet i polarfronten basert på eksisterende kunnskap
- Gjennomføre nye analyser av tilgjengelige observasjonsdata og modelldata for å undersøke polarfrontens struktur og variabilitet
- Trekke frem kunnskapshull som påvirker verdi- og sårbarhetsvurderingen, i tillegg til kunnskapshull som er viktig å sette for å kunne si noe om hvordan polarfronten kan ventes respondere på eventuell klimavariabilitet og -endringer i fremtiden

2.2.3 Format på leveransen

Rapporten er en fagrapport som bruker referanser som i vitenskapelige, fagfelleverderte publikasjoner, men det er samtidig benyttet en del såkalt gråliteratur i gjennomgangen av eksisterende kunnskap, kanskje i større grad enn hva som ville vært tilfellet for en fagfelleverdert publikasjon. Rapporten består i hovedsak av to moduler:

- Modul 1 Gjennomgang av fysiske og biologiske forhold i polarfronten
- Modul 2 Verdi- og sårbarhetsvurdering i polarfronten

Begge moduler består videre av ulike delkapitler for de ulike trofiske nivåene i næringskjeden, inkludert fysikk. I tillegg omfatter modul 1 en kartlegging av polarfrontens struktur og variabilitet, samt ventede endringer i fremtiden.

Rapporten ble oversendt Faglig forum 30.06.2018 som en pdf-fil, og med utvidet frist til 15. september for å gjennomføre faglig kvalitetssjekk, samt tid til intern godkjenning på HI før offisiell utsendelse av fagrapport. Rapporten vil bli trykket som en egen rapport i HIs egen rapportserie «Fisken og Havet».

2.2.4 Polarfronten som verdifullt og sårbart område i forvaltningsplanen for Barentshavet

I alle forvaltningsplaner for norske havområder, inkludert forvaltningsplanen for Barentshavet og havområdene utenfor Lofoten (St. meld. nr. 8 (2005-2006); oppdatert Meld. St. 10 (2010-2011)), er det identifisert særlig verdifulle og sårbare områder på grunnlag av ulike faglige utredninger. Verdifulle og sårbare områder er delområder i et planområde som ut fra naturfaglige vurderinger har særlig betydning for biologisk mangfold og/eller biologisk produksjon, og hvor skadevirkninger vil kunne være langvarige eller irreversible.

Både i forvaltningsplanen for Barentshavet og havområdene utenfor Lofoten (St. meld. nr. 8 (2005-2006) og oppdateringen av denne Meld. St. 10 (2010-2011)), er polarfronten, på bakgrunn av faglige vurderinger, identifisert som et særlig verdifullt og sårbart område som følge av høy primærproduksjon i området og medfølgende viktighet i form av beite- og oppvekstområde for en rekke arter på ulike trofiske nivåer (Olsen & von Quillfeldt, 2003). Miljøendringer og -skader i dette området vil derfor kunne gi store og muligens irreversible skadevirkninger på deler av den biologiske produksjonen og mangfoldet i polarfrontområdet. I forbindelse med oppfølgingen av forvaltningsplanen for Barentshavet er det imidlertid uttrykt et behov for bedre avgrensning av polarfrontområdet som et særlig sårbart og verdifullt område. I dette arbeidet er det derfor lagt vekt på de fysiske strukturene i polarfrontområdet, hvordan disse varierer gjennom året og mellom år, samt biofysiske koblinger og påvirkning oppover i de trofiske nivåene.

2.2.5 Relasjon til fagrapport på iskantsonen

Iskantsonen og polarfrontområdet overlapper tidvis geografisk, spesielt i vestlige deler av Barentshavet og hovedsakelig i vinterhalvåret, ettersom det er en nær relasjon mellom polarfrontens posisjon og sjøisens utbredelse (Loeng & Vinje, 1979; Loeng, 1991). Derfor vil det være betydelig overlapp mellom polarfrontområdet og området som dekkes av iskantsonen når dens sesongvariasjon inkluderes. Samtidig har vår kunnskap om det marine økosystemet i Barentshavet begrenset oppløsning i tid og rom. For eksempel vet vi at noen fiskebestander oppholder seg helt eller delvis i området som utgjør iskantsonen og polarfrontområdet og at dette kan gjelde i hele eller i deler av året. Derfor er det en del overlapp mellom denne rapporten om polarfronten og iskantsonerapporten når det gjelder biologisk beskrivelse, samt verdi- og sårbarhetsvurdering for polarfronten.

3 Tidligere undersøkelser

Det er opp gjennom årene blitt gjennomført en del undersøkelser i deler av området langs og rundt polarfronten, og det finnes litteratur knyttet til de fysiske forholdene. Havforskningsinstituttet har gjennom sine rutineundersøkelser i Barentshavet en god del observasjoner av polarfrontens posisjon. En del detaljerte undersøkelser i frontområdet ble startet under prosjektet «Lodda på sommerbeite» i 1979 og fortsatte under Pro Mare (1984-1989). En del utenlandske studier har også funnet sted, men de har i all hovedsak dreiet seg om polarfrontens fysiske egenskaper.

3.1 Pro Mare (1984-1989)

Marinbiologisk Forskningsprogram i Arktis (Pro Mare) var et omfattende forskningsprogram i Barentshavet, og fokuserte på sentrale og nordlige deler av Barentshavet. Sentralt i overvåkningsprogrammet var det såkalte «Snitt I», som var en forlengelse av snittet «Vardø Nord» i nord-nordøstlig retning. Dette snittet strekker seg i forlengelsen av «Vardø Nord» fra det nordlige Hopendypet, gjennom polarfronten og opp på Storbanken. Verdt å nevne er at et tilsvarende snitt også står sentralt i overvåkningsprogrammet til det nasjonale prosjektet «Arven etter Nansen». Således er det naturlig å trekke frem resultatene fra Pro Mare som grunnlag for tolkningen av resultater fra kommende undersøkelser. Pro Mare har resultert i mer enn 300 publikasjoner, og mange sammenfattende artikler ble publisert i *Polar Research* (Sakshaug et al., 1991), samt i boken «Økosystem Barentshavet» (Sakshaug, 1992). Mye av resultatene, spesielt i toktrappertene, er imidlertid såkalt «grå litteratur», som ikke har vært gjennom en fagfelle vurdering. Resultatene derfra er tatt med i denne rapporten da de bidrar til å støtte opp under nyere litteratur gjennom å bekrefte/avkrefte endringer over tid, i tillegg til å inkludere årstidsvariasjoner. Disse dataene, som ikke er refererte i tidligere grunnlagsdokumenter for forvaltningsplanen, omfatter fysisk oseanografi, næringssalter, plante- og dyreplankton, samt noe informasjon om utbredelse av fisk.

3.2 Det internasjonale Polaråret 2007 - 08

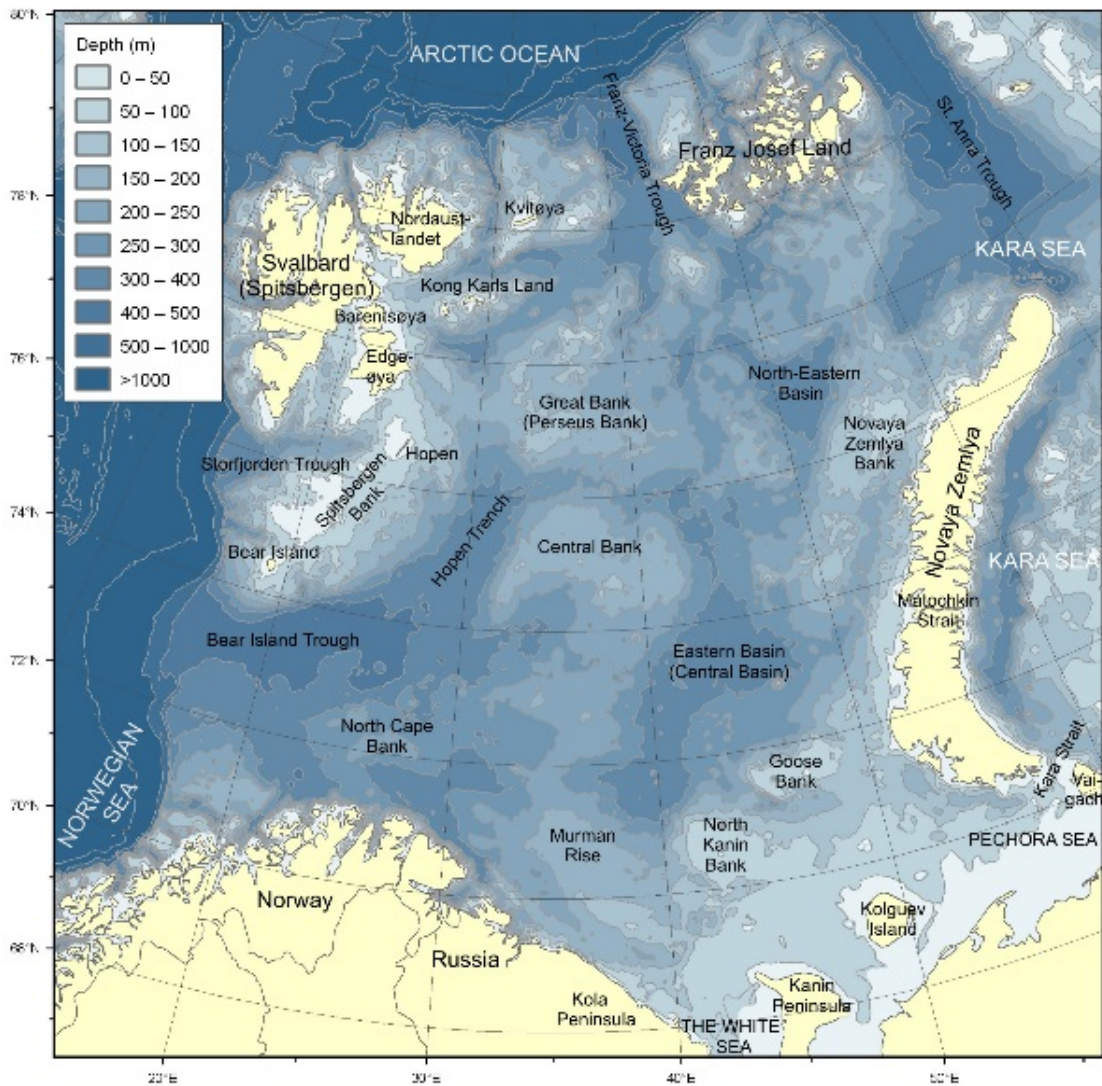
Under det internasjonale Polaråret 2007 - 08 gjennomførte prosjektet Norwegian Ecosystem Study of Subarctic and Arctic Regions (NESSAR) et større feltprogram i polarfronten både langs Spitsbergenbanken og på Storbanken i 2007. Resultater herfra ble først publisert i 2014 (Drinkwater & Tande, 2014), det vil si etter forrige oppdatering av forvaltningsplanen for Barentshavet og Lofoten. Resultatene inkluderes likevel her i litteraturgjennomgangen og ikke som en del av kapittel 5.2 «Nye analyser av de fysiske forhold i polarfronten». Konklusjonene herfra er i hovedsak de samme som fra Pro Mare, men med langt mer detaljerte analyser av fronten og dens egenskaper. Resultater herfra som bidrar til ny kunnskap i forhold til konklusjonene i oppdateringen av forvaltningsplanen for Barentshavet og Lofoten (Sunnanå et al., 2010) er påpekt i litteraturgjennomgangen under.

3.3 Internasjonal publisering

Det finnes også noe litteratur basert på sporadiske undersøkelser, særlig på frontens fysiske karakteristikk, inklusiv dens posisjon. Det er også hentet noe informasjon fra litteratur som beskriver andre frontsystemer for sammenligningens skyld.

4 Topografi, sirkulasjon og vannmasser

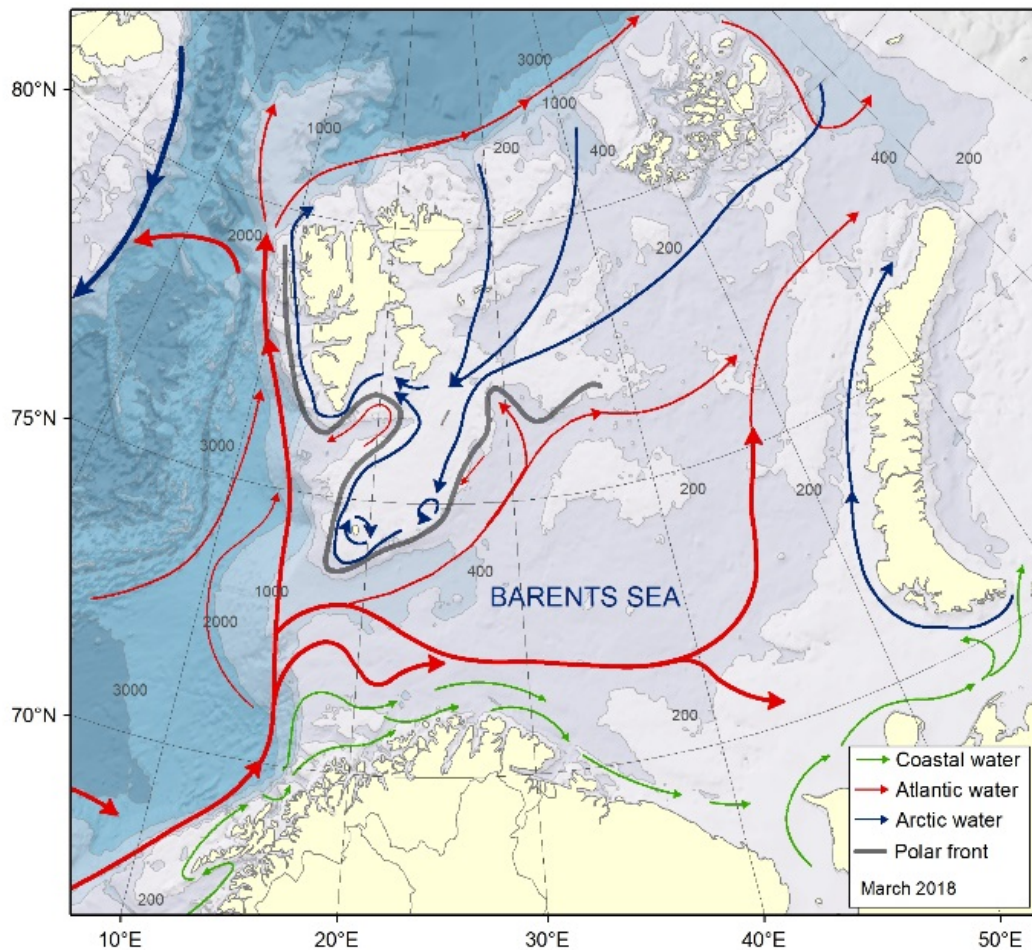
Barentshavet er et av de grunne sokkelhavene som omgir det dype Polhavet. I vest grenser det mot Norskehavet ved kontinentalskråningen og i øst er Novaja Semlja-grensen (Fig 4.1). I sør er Norge og Russland den naturlige grensen og i nord er det kontinentalskråningen mot Polhavet som begrenser utstrekningen. Barentshavet dekker omtrent 1,4 million km² og har et gjennomsnittsdyp på 230 m (Loeng, 1991). Største dybde er ca. 500 m og ligger i Bjørnøyrenna på grensen mot Norskehavet. Barentshavet har flere store og grunne bankområder som har stor innflytelse på havstrømmene i området. De viktigste er Spitsbergenbanken, Storbanken, Sentralbanken og Novaja Semljabanken (Fig. 4.1).



Figur 4.1. Kart over Barentshavet. Blåtoner viser bunntopografi.

Barentshavet er en overgangssone mellom relativt varmt atlantehavsvann og kystvann i sør og kalde arktiske vannmasser i nord (Loeng, 1991; Ozhigin et al., 2011). I Barentshavet kommer Kyststrømmen og Atlanterhavsstrømmen, begge med temperaturer høyere enn 3 °C, inn gjennom den vestlige åpningen (Fig. 4.2). Kyststrømmen har en saltholdighet lavere enn 34,7

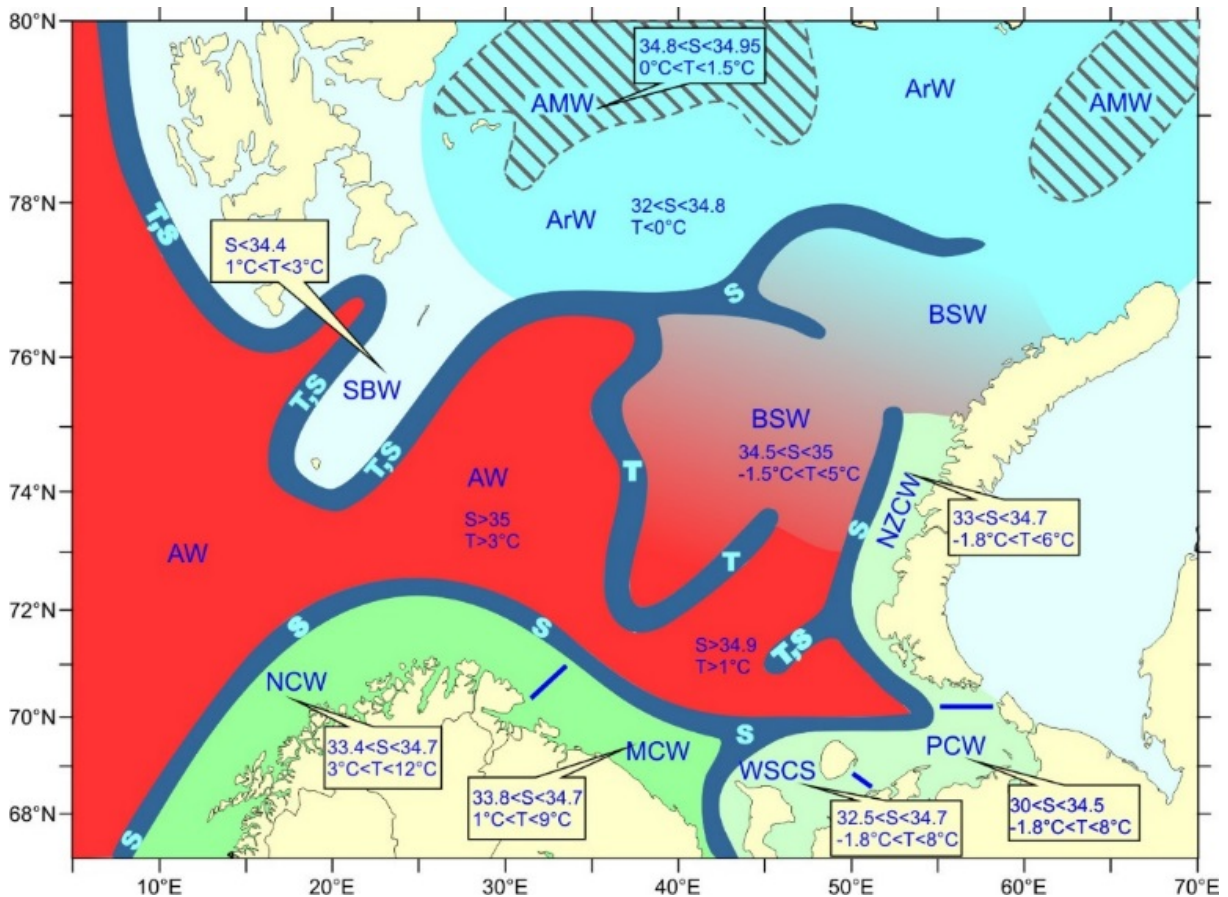
nærmest land, mens atlantehavsvannet stort sett har saltholdighet høyere enn 35,0 ved innløpet til Barentshavet og den avtar østover. Disse to vannmassene dominerer i den sørlige delen av Barentshavet (Fig. 4.3). Om vinteren er transporten av atlantehavsvann høyest samtidig med at strømmen er smal og dyp (Ingvaldsen et al., 2004). Om sommeren er strømmen grunnere og bredere. På sin vei gjennom Barentshavet blir egenskapene til atlantehavsvannet endret ved blanding med omliggende vannmasser, avkjøling fra atmosfæren og avrenning av ferskvann fra land og noe vann fra Karahavet (Smedsrud et al., 2013).



Figur 4.2. Hovedtrekkene i strømforholdene i Barentshavet.

Denne omformingen er viktig for ventilering av Polhavet (Aagaard & Woodgate, 2001; Schauer et al., 2002). Arktisk vann dominerer det nordlige Barentshavet. Det kommer hovedsakelig inn i stredet mellom Franz Josef Land og Novaja Semlja og noe mindre kommer inn fra nord (Loeng, 1991). Mesteparten av det arktiske vannet forlater Barentshavet rundt Spitsbergenbanken og nordover langs vestkysten av Svalbard. Om sommeren ligger det et smeltevannslag på typisk 5-20 m (men noen ganger opp til 50 m) tykkelse over det arktiske vannet (Loeng, 1991). Om vinteren gjennomblandes vannsøylen på grunn av avkjøling og isdannelse i nord slik at vannsøylen blir homogen fra overflaten og så dypt vi finner arktisk vann.

I tillegg finnes det flere vannmasser som dannes lokalt i Barentshavet. Det gjelder Barentshavsvann, Barentshavsunnvann og Spitsbergenbankvann (Ozhigin et al., 2011). De fysiske oseanografiske forhold i Barentshavet, inkludert vannmassefordeling, sirkulasjonsmønster, blandingsforhold og fronter er beskrevet i bl.a. Loeng (1991), Pfirman et al. (1994) og Sundfjord et al. (2007), og senere oppdatert av Loeng & Drinkwater (2007), Ingvaldsen & Loeng (2009), Ozhigin et al. (2011) og Lien et al. (2013).



Figur 4.3. Fronter og vannmassefordeling i Barentshavet. T - fronter bestemt av temperatur, S - fronter bestemt av saltholdighet, T,S - fronter definert av både temperatur og saltholdighet. NCW - kystvann, AW - atlantehavsvann, ArW - arktisk vann, BSW - Barentshavsvann, MCW - Murmanstrøm-vann, WSCS - Kvitsjøvann, SBW - Spitsbergenbankvann, PCW - Pechorasjøvann, AMW - mikset arktisk vann, NZCW - Novaya Zemlya kystvann. Fra: Ozhigin et al., 2011

5 Oseanografiske forhold

Fronter mellom ulike vannmasser innebærer ofte effektiv overføring av fysiske og biokjemiske egenskaper mellom vannmassene og dette kan påvirke den biologiske produksjonen. Fronter er ofte knyttet til økt primærproduksjon (Le Fèvre, 1987), vanligvis knyttet til økt vertikal transport av næringsalter på grunn av utstrakt blanding av vannmasser og resulterende oppstrømning (Allen et al., 2005). Fronter kan også være områder med aggregering og dermed høye konsentrasjoner av dyreplankton og fiskelarver (Franks, 1992; Munk et al., 2009), noe som medfører «hot-spots» for marint liv. Fronter kan også være grensen mellom ulike arter som foretrekker ulike vannmasser basert på temperaturpreferanse – i polarfronten mellom arktiske og boreale arter.

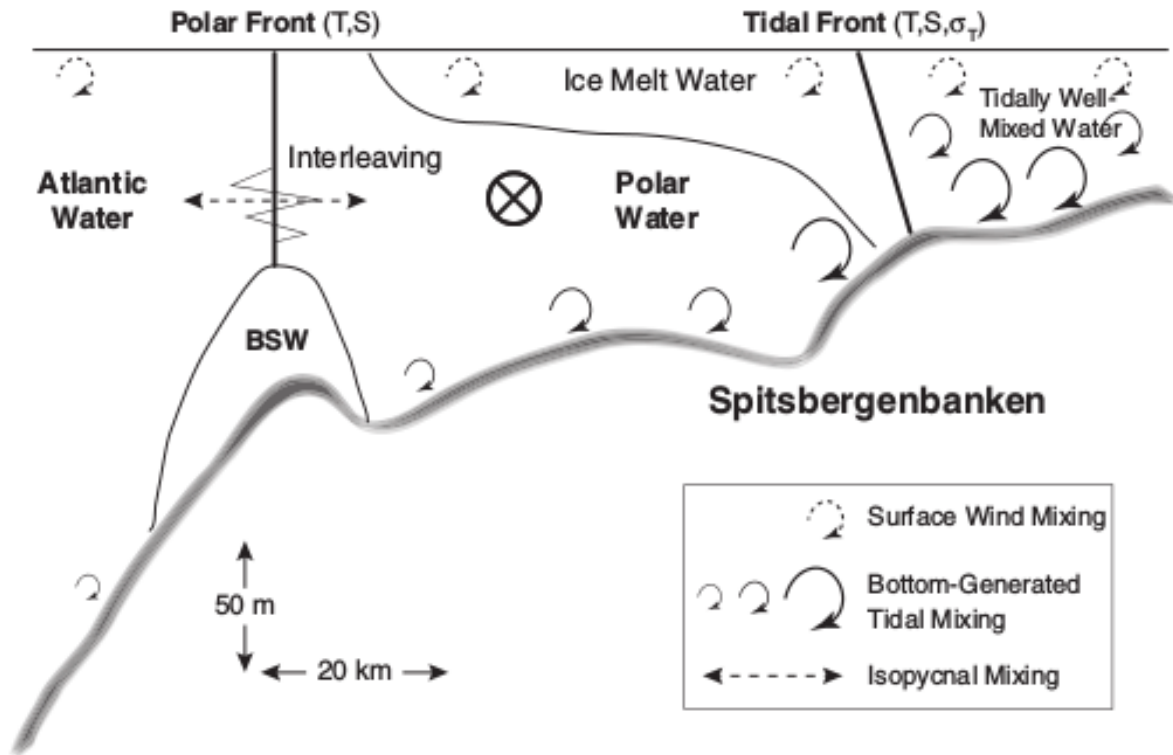
5.1 Oppsummering av tilgjengelig litteratur

Det finnes flere fronter i Barentshavet (Fig. 4.3). Helt i sør er det en front mellom kystvannet og atlantehavsvannet og som i stor grad skyldes en forskjell i saltholdighet mellom de to vannmassene. Nord for Bjørnøyrenna og Hopen dypet er den fronten som vanligvis defineres som polarfronten. På grunnlag av horisontale gradienter i temperatur og saltholdighet ble posisjonen til polarfronten først kartlagt av Izhevsky (1958), en posisjon som er sterkt påvirket av bunntopografien i den vestlige delen (Johannessen & Foster, 1978; Gawarkiewicz & Plueddemann, 1995; Parson et al., 1996; Harris et al., 1998). Posisjonen er mer variabel i øst hvor styrken på innstrømningen av atlantehavsvann er av stor betydning (Loeng, 1991; Årthun et al., 2012; Lien et al., 2017). I vest, rundt Spitsbergenbanken, følger polarfronten i hovedsak dybdekonturen mellom 150-200 m (Harris et al., 1998; Fer & Drinkwater, 2014). Den går så rundt Hopen dypet (sørvest av Storbanken) og svinger så sørover og videre østover rundt Sentralbanken (Fig. 4.3). Øst for Sentralbanken er det ingen sterk topografisk styring, og den mister etter hvert sin karakteristikk som front. Ifølge Matishov et al. (2012) er polarfrontens lengde ca. 1500 km.

5.1.1 Fronten rundt Spitsbergenbanken

Rundt Spitsbergenbanken har polarfronten en komplisert romlig struktur (Fig. 5.1). Her er polarfronten definert ved gradienter i både temperatur og saltholdighet, hvor begge avtar fra atlantisk side til arktisk side. Dette området er merket med *T,S* i Figur 4.3 og er lokalisert omtrent ved 200 m dyp langs østsiden av Spitsbergenbanken (Loeng, 1991; Fer & Drinkwater, 2014) og rundt Hopen dypet (Ozhigin et al., 2011). Men fordi de horisontale forskjellene i temperatur og saltholdighet har motsatt effekt på tettheten – avtagende temperatur øker tettheten mens avtagende saltholdighet reduserer tettheten - er den horisontale tetthetsgradienten gjennom fronten veldig svak. Denne delen av fronten setter derfor ikke opp såkalt sekundær sirkulasjon som gir opphav til vertikal omrøring og påfølgende turbulente blandingsprosesser. Polarfronten rundt Spitsbergenbanken kalles derfor en «passiv» front (Fer & Drinkwater, 2014).

Den kompliserte romlige strukturen til polarfronten rundt Spitsbergenbanken har imidlertid gitt opphav til en del unøyaktigheter når man refererer til polarfronten. For i dette området er det om sommeren også to andre fronter (Loeng, 1991; Fer & Drinkwater, 2014), begge med forskjellige egenskaper fra polarfronten, slik som den er beskrevet over, og med tilhørende fysisk-biologiske implikasjoner.



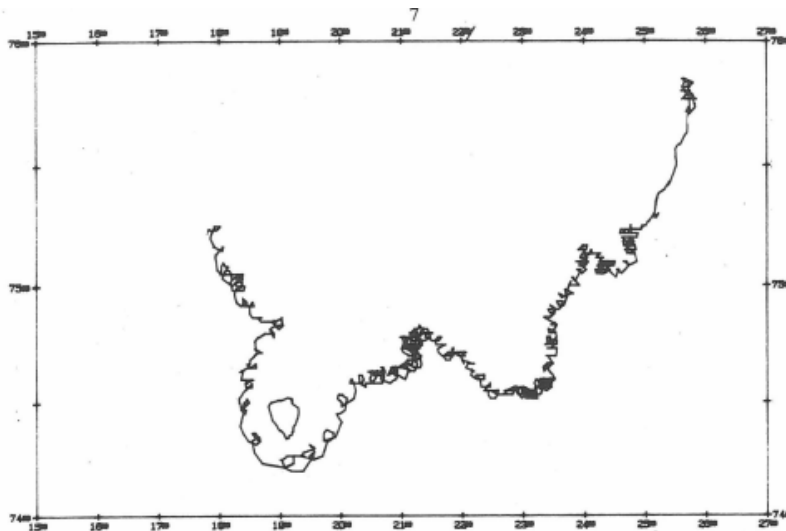
Figur 5.1. Skjematisk fremstilling av fronter/grenselag mellom vannmasser (streker) og blandingsprosesser (piler) langs Spitsbergenbanken. Strømmene går inn i arket, dvs. med grunnere dyp til høyre (runding med kryss). BSW – Barents Sea Water. Fra Fer & Drinkwater (2014).

Ettersom store deler av Spitsbergenbanken er veldig grunn, vil de deler av banken som er grunnere enn 50-60 m stort sett være vertikalt gjennomblandet grunnet sterke tidevannsstrømmer kombinert med blanding som følge av vind. I tillegg vil det at treghetssvingningene har samme periode som det halvdaglige tidevannet (12,5 timer) i nærheten av Bjørnøya (~74,5°N) bidra til blandingsprosessene i dette området. Følgelig vil det langs kanten av banken være en sone hvor vannsøylen går fra å være gjennomblandet til å være lagdelt. Dette setter opp en tidevannsfront rundt banken omtrent langs konturen for 50 meters bunndyp (Fer & Drinkwater, 2014). Ettersom sesongmessige variasjoner i hydrografien gjør at det bare er i sommerhalvåret at denne fronten vil være synlig i vannmassekaraktistikene, ble denne fronten referert til som «sommerfronten» av Loeng (1991), selv om mekanismen som er årsak til fronten (lite bunndyp og sterke tidevannsstrømmer) er tilstede hele året. Men i motsetning til polarfronten som beskrevet over, har denne tidevannsfronten sterke horisontale tetthetsgradienter i sommerhalvåret, og er derfor en «aktiv» front med sterk vertikal blanding (Fer & Drinkwater, 2014). I flere tidligere studier er imidlertid denne tidevannsfronten referert til som polarfronten eller som overflatesignaturen til polarfronten. Dette til tross for at disse to frontene er lokalisert på forskjellige bunndyp (tidevannsfronten ved bunndyp < 100 m og polarfronten ved bunndyp ~200 m) og de har forskjellig årsak (tidevann vs. forskjell i vannmasser) og tilhørende dynamikk (aktiv vs. passiv). De biofysiske implikasjonene av tidevannsfronten kommer vi tilbake til under kapitlene om de ulike trofiske nivåene, men hovedkonklusjonen er at den aktive tidevannsfronten (i motsetning til den passive polarfronten) er svært viktig for primærproduksjonen, med påfølgende kaskadeeffekter oppover i de trofiske nivåene i næringskjeden.

I tillegg til tidevannsfronten (sommerfronten) og polarfronten, dannes det en smeltevannsfront i overgangen mellom atlantehavsvannet og området hvor man har et overflatelag som er betydelig ferskere, som en følge av tilførsel av ferskvann fra smelting av sjøis (Loeng, 1991; Våge et al., 2014). Issmeltingen trenger ikke foregå der denne fronten observeres; smeltevann fra havis som smelter lenger nord og øst i Barentshavet vil generelt tendere til å flytte seg mot sørvest slik at smeltevannsfronten kan observeres sør og vest for områdene som har vært isdekket i en gitt periode. Dette overflatelaget vil også raskt varmes opp av innkommende solstråling, og både ferskvannet og oppvarmingen vil bidra til å lagdele vannsøylen og gi en svært stabil lagdeling. Denne lagdelingen vil bidra til å «maskere» polarfronten i overflaten, og polarfronten vil således om sommeren typisk være identifiserbar fra 50 meters dyp og ned mot bunnen. Denne smeltevannsfronten kan imidlertid sammenfalle med polarfronten og dermed gi polarfronten en signatur helt til overflaten, men ikke nødvendigvis (i kapittel 5.1.3, Fig. 5.3, lenger nede gis det et eksempel hvor de to frontene er frikoblet fra hverandre ved Storbanken (Våge et al., 2014)). Også denne fronten blir ofte referert til som overflatesignaturen til polarfronten, selv om den i en del tilfeller er frikoblet fra polarfronten som skiller atlantehavsvann fra arktisk vann i dypet. Smeltevannsfronten har, i likhet med tidevannsfronten om sommeren, en horisontal tetthetsgradient og karakteriseres som en «aktiv» front. Men i motsetning til både tidevannsfronten og den dypere polarfronten, som begge er sterkt topografisk styrte, er smeltevannsfronten mer flyktig og kan variere betydelig mellom år både i styrke og posisjon.

Tidligere mente man at det varmere og saltere atlantehavsvannet strømmer nordover langs østsiden av Spitsbergenbanken, mens det kaldere og mindre salte arktiske vannet strømmer sørover (Johannessen, 1986; Loeng, 1991; Loeng, 1979). Slike motgående strømmer vil i så fall gi opphav til turbulent blanding i frontområdet mellom de to vannmassene. Resultater fra strømmålinger og modeller har imidlertid vist at atlantehavsvannet resirkulerer i Hopen-dypet, ved at det strømmer nordøstover langs østsiden av Hopen-dypet og resirkulerer i en sørgående strøm med atlantehavsvann parallelt med det arktiske vannet, som antydnet i Figur 4.2 (Parson, 1995; Poulin et al., 1995; Gawarkiewicz & Plueddmann, 1994, 1995; Skagseth, 2008), men også at atlantehavsvannet episodisk kan snu og strømme nordøstover (Lien et al., 2013a). Langs skråningen av hele Spitsbergenbanken er det en mengde virvler i grenseområdet mellom de to vannmassene. Drivende bøyer som ble sluppet i området under Pro Mare demonstrerte dette tydelig, og disse virvlene kan ha en levetid fra timer opp til 14 dager (Fig. 5.2). Disse virvlene har trolig stor betydning for blanding av de to vannmassene. Den relativt jevne sydlige driften langs østsiden av Spitsbergenbanken bekrefter at strømmene på begge sider av fronten går sørover. Dette strømmønsteret er styrt av bunntopografien i Hopen-dypet. En mer detaljert oppsummering av strømmønsteret i Barentshavet er gitt i Ingvaldsen & Loeng (2009), og Ozhigin et al. (2011).

I polarfronten er det en vertikalt stabil tetthetsgradient (tettheten øker med dypet), mens det kan være store variasjoner i den vertikale temperatur- og saltholdighetsfordelingen (Fer & Drinkwater, 2014). Dette skyldes blanding (fletting) av atlantisk og arktisk vann i tynne sjikt (1-10 m i tykkelse) når disse to vannmassene går i motsatt retning av hverandre. Det betyr at man har lag med høy temperatur og saltholdighet og lag med lav temperatur og saltholdighet liggende lagvis samtidig som en stabil vannsøyle opprettholdes.



Figur 5.2. Drift av Argosbøye med seil i 30 meters dyp. Bøyen ble utsatt sørøst av Hopen 2. juni og tatt opp 29. august 1984.

(Hassel et al., 1984)

5.1.2 Årssyklus over Spitsbergenbanken

I det følgende er resultatene fra tre påfølgende tokt under Pro Mare referert og diskutert (Hassel et al., 1984). Originalteksten fra toktrapporten er gjengitt i kursiv (med små modifikasjoner) og figurene er vist i Appendiks.

I mai 1984 var forholdene over banken tilnærmet vertikalt homogene, det vil si at temperatur og saltholdighet ikke varierte i vannsøylen. Dette betyr også at det ikke var noen vertikal tetthetsgradient. Det kaldeste vannet fantes på østsiden av banken hvor det er en sørgående strøm. Temperaturen var den samme som observert i tidligere år. På begge sider av Spitsbergenbanken lå front-området mellom atlantehavsvann og arktisk vann. Dette området var karakterisert ved sterke horisontale gradienter i temperatur og saltholdighet og vannmassene var lagdelt på enkelte stasjoner i frontområdet. Dette skyldes blanding mellom vannmassene f.eks. ved hvirveldannelser. Til tross for de sterke horisontale gradientene i temperatur og saltholdighet, er det bare en svak horisontal tetthetsgradient.

Kommentaren om at atlantehavsvannet og det arktiske vannet ligger lagvis og med liten tetthetsgradient horisontalt i frontområdet stemmer overens med hva Fer & Drinkwater (2014) påpeker fra sine observasjoner.

I august 1984 ble det foretatt observasjoner langs et snitt identisk med snittet i mai samme år. Sammendraget fra Hassel et al. (1984) sier:

På østsiden av Spitsbergen-banken var det en sørvestgående strøm av kaldt arktisk vann. Denne strømmen kommer fra områdene nord for Hopen og fortsetter sørover forbi Bjørnøya. Dette kan tydelig ses i Figur 5.2, som viser drivbanen til en satellittposisjonert bøye med drivseil i 30 m dyp. Bøyen drev i polarfronten langs østsiden av Spitsbergenbanken, men i perioder oppholdt den seg relativt lenge i områder med virveldannelse, hvor arktisk vann og atlantehavsvann møtes og blandes. Selv om vannmassene over de grunneste partiene av banken var gjennomblandet som i mai, hadde det foregått store endringer i både temperaturforholdene og saltholdigheten mellom de to toktene. Temperaturen var steget ca. 3°C og var august mellom 2-3°C over de grunne partiene. Saltholdigheten var mellom 0,3-0,5‰ lavere i de samme områdene i august enn i mai/juni. Dette skyldes at vannmassene i august i stor grad består av oppvarmet arktisk vann, som på grunn av ismeltingen, har fått lavere saltholdighet i løpet av sommeren. Den relativt høye temperaturen, gir grunn til å tro at vannmassene må ha oppholdt seg lenge over grunnområdene. Trolig eksisterer det en stor virvel midt på banken hvor vannmassene vil oppholde seg over lengre tid.

Observasjonene fra august viser tydelig sterke horisontale gradienter i temperatur og saltholdighet, men det er ikke noen tetthetsgradient. En horisontal tetthetsgradient ble imidlertid observert på nordsiden langs det arktiske vannet, som Loeng (1991) definerte som en sommerfront og Fer & Drinkwater (2014) definerte som en tidevannsfront.

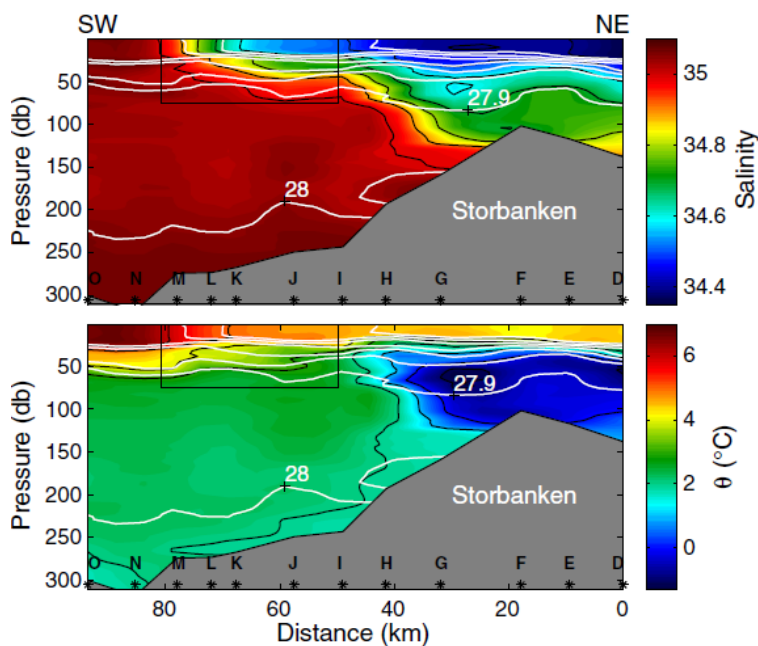
I januar 1985 ble det observert hydrografi langs et snitt som gikk litt lenger nord. Funnene oppsummeres i Hassel et al. (1986):

Langs østskråningen av Svalbardbanken var forholdene noe mer kompliserte. Det kalde vannet i Bjørnøystrømmen ($t < -1^{\circ}\text{C}$) gikk mot sør i de øverste ca 70 m. Under denne strømmen fant man atlantehavsvann med betydelig høyere saltholdighet og temperatur. Hvor stabilt dette systemet er, og hvorvidt forholdene holder seg slik hele vinteren, vet man ingenting om.

I motsetning til høsten før, da det arktiske vannet ble observert nært bunnen, var kjernen i det kalde, arktiske vannet i januar nær overflaten. Det ble også observert en horisontal tetthetsgradient i polarfronten mellom det atlantiske og arktiske vannet. At atlantehavsvannet ligger høyere opp på skråningen langs Spitsbergenbanken ble også observert i mars 2014 (Dobrynin & Pohlmann, 2015). Lien et al. (2013) viste at strømmen langs østsiden av Spitsbergenbanken er styrt av lokalt vindfelt, og at lokal lavtrykksaktivitet vil presse atlantehavsvannet høyere opp på skråningen langs banken. Typisk vil det være høyere frekvens av lavtrykksaktivitet i vinterhalvåret, noe som kan forklare hvorfor en slik forflytning av polarfronten hovedsakelig har blitt observert i vinterhalvåret. Betydningen av mengden innstrømmende atlantehavsvann på polarfrontens posisjon er også diskutert av Ingvaldsen (2005) og Oziel et al. (2016). Ingvaldsen (2005) viste at polarfrontens posisjon sør av Bjørnøya ikke var så stabil som tidligere trodd. Frontens posisjon varierer i takt med klimaet i Barentshavet. I varme år med sterk vind er fronten lokalisert høyere opp på banken enn i kalde perioder.

5.1.3 Fronten sør av Storbanken

En detaljert studie av polarfrontens fysikk ved Storbanken sommeren 2008 ble utført av Våge et al. (2014). Arktisk vann ble observert over banken mens atlantehavsvann ble observert sør av banken. Ved Storbanken dannes fronten der det noe tyngre atlantehavsvannet går nordover under det sørgående og noe lettere arktiske vannet (Fig 5.3; Fig 2 i Våge et al., 2014). Tettheten i overflaten er høyere sør for fronten enn nord for fronten i samme dyp. At overflatevannet lengst nord er noe lettere skyldes at det inneholder mer ferskvann som følge av ismelting. I dypet er det ingen tetthetsgradient horisontalt fra sør mot nord (Fig. 5.3). Disse observasjonene samsvarer med resultatene fra Pro Mare, for eksempel Ellertsen et al. (1982) og Hassel et al. (1984). Her ser man tydelig hvordan det mindre salte arktiske vannet legger seg over det saltene og tyngre atlantehavsvannet; det er tydelig vertikal lagdeling langs hele snittet. Man ser også et tydelig eksempel på at polarfronten mellom atlantehavsvannet og det arktiske vannet er frikoblet fra smeltevannsfronten lenger sør, slik at polarfronten mister sin overflatesignatur og kun er synlig fra ca. 50 meter og dypere (Fig. 5.3). Her er distansen fra polarfronten til smeltevannsfronten ca. 30 km (~15 nm).



Figur 5.3. Hydrografisk snitt fra Hopen dyppet og nord til Storbanken. (Våge et al., 2014)

Lengre øst, rundt Sentralbanken, er polarfronten hovedsakelig styrt av temperaturgradienten (merket T i Fig. 4.3; Oziel et al., 2016), mens det nord for samme banken er en front som hovedsakelig er styrt av gradienten i saltholdighet (merket S i Fig. 4.3; Oziel et al., 2016). Begge de to sistnevnte delene av polarfronten er mindre tydelige enn frontene rundt Spitsbergenbanken (Fer & Drinkwater, 2014; Oziel et al., 2016), men disse østlige delene av polarfronten har imidlertid en horisontal tetthetsgradient og dermed også en mer dynamisk frontsoner, og polarfronten er her derfor mer «aktiv» enn lenger vest.

Skjoldal et al. (1987) fant en signifikant relasjon mellom polarfrontens posisjon i Hopen dyppet og temperaturen i atlantehavsvannet i Vardø-N snittet. De fant at posisjonen til polarfronten varierte med mer enn 40 nautiske mil nord i Hopen dyppet mellom de kalde årene 1979 og 1981 og det varmeste året i den analyserte tidsserien, som var 1983. De relaterte polarfrontens posisjon til styrken på den atlantiske innstrømmingen til Barentshavet. Endringer i innstrømmingen av atlantehavsvann til Barentshavet vil også gi en respons i polarfrontens posisjon nedstrøms i den østlige, russiske delen av Barentshavet. Mellomårlig variasjon i temperatur gir samvariasjoner i isdekket (økt temperatur gir mindre is) på mellomårlig tidsskala øst i Barentshavet (Årthun et al., 2012; Onarheim et al., 2015), samt mellomårlige endringer i utbredelsen av atlantehavsvann og følgelig også polarfrontens posisjon i det østlige Barentshavet. Johannesen et al. (2012) og Dalpadado et al. (2012) viste at arealet som var dekket med atlantehavsvann i Barentshavet hadde økt siden 1970. Oziel et al. (2016) så på data for perioden 1980-2011. De konkluderte med at mengden med atlantehavsvann i Barentshavet var fordoblet i løpet av 30 år. Doblingen knyttes til atlantifiseringsprosessen forslått av Årthun et al. (2012), hovedsakelig som en følge av økt temperatur og saltholdighet i det innstrømmende atlantehavsvannet, slik det er observert i de faste snittene fra Gimsøy-NV til Vardø-N. Endringer i temperaturen og isutbredelsen i Barentshavet på mellomårlig og lengre tidsskala er hovedsakelig knyttet til endringer i temperaturen på det innstrømmende atlantehavsvannet (f.eks. Onarheim et al., 2015). Samtidig kan endringer i mengden innstrømmende vann på daglig til ukentlig tidsskala, som følge av lavtrykksaktivitet i Barentshavet, gi mer umiddelbar respons både på polarfrontens og iskantsonens posisjon nedstrøms i det østlige Barentshavet (Lien et al., 2013a; 2017).

5.2 Nye analyser av de fysiske forhold i polarfronten

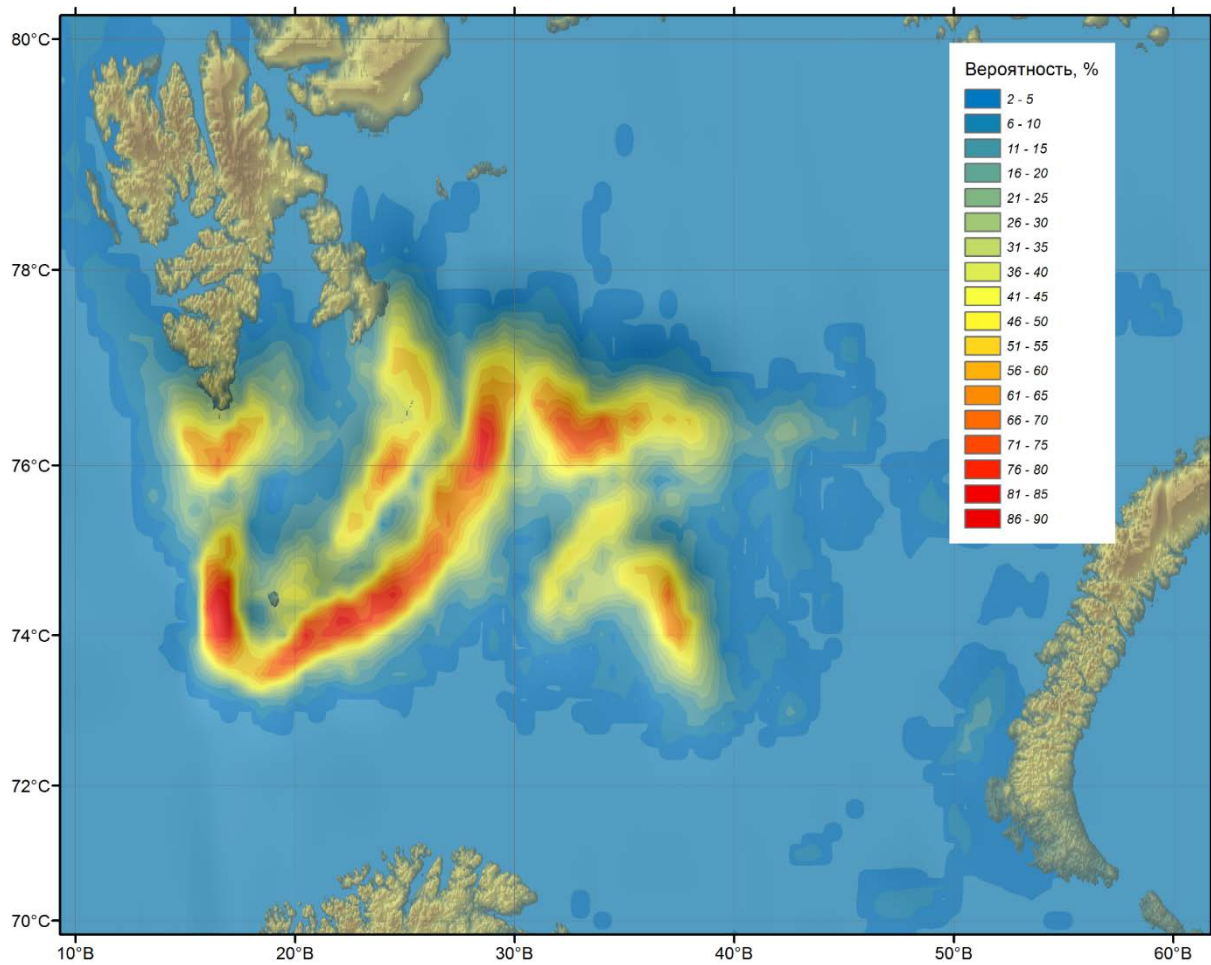
I tillegg til litteraturstudien i kapittel 5.1, er det gjort nye analyser av tilgjengelige hydrografiske data og resultater fra en numerisk simulering. Disse analysene er presentert i kapittel 5.2.1 og 5.2.2. Mens resultatene fra eksisterende litteratur stort sett er basert på enkelte feltundersøkelser innenfor begrensede områder, vil de nye analysene bidra med bedre dekning og oppløsning i både rom og tid. Disse analysene vil følgelig kunne si noe om frontens stabilitet og persistens både på kort tidsskala (mellom sesong og år) og lang tidsskala (mellom tiår). Videre, dersom resultatene fra nye analyser basert på både observasjoner og modellsimuleringer over en lengre periode samsvarer med tidligere observasjoner, om enn utført over korte tidsrom, så vil dette bygge oppunder en konsistent forståelse av polarfronten. Selv om polarfronten er karakterisert ved gradienter i både temperatur og saltholdighet, har vi her kun brukt temperatur for å identifisere frontområdet, ettersom skillet mellom atlantehavsvann og arktisk vann er representert både ved temperatur- og saltholdighetsforskjeller.

5.2.1 Hydrografiske observasjoner

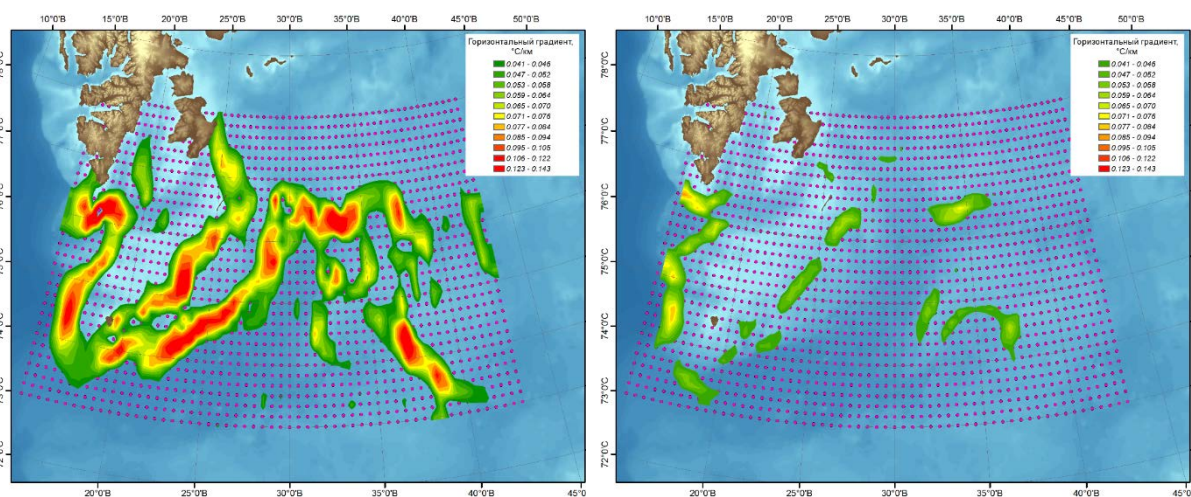
Basert på hydrografiske observasjoner i august-september i perioden 1960-2017, er det gjort beregninger av horisontal temperaturgradient i 50 meters dyp (lign. 5.1), det vil si endring i temperatur per lengdeenhet (totalt både nord-sør og øst-vest), her °C/km. Det defineres som en front dersom temperaturgradienten overstiger 0,04 °C/km. Resultatet er vist i Figur 5.4, som viser sannsynligheten for tilstedeværelse av en temperaturfront, det vil si sannsynlighet for at temperaturgradienten i 50 meters dyp overstiger 0,04 °C/km i perioden 1960-2017. Vi ser at det vanligvis er en temperaturfront langs østsiden av Spitsbergenbanken og østover langs Hopen dypet mot Storbanken. I dette området er sannsynligheten for tilstedeværelse av en temperaturfront som overstiger 0,04 °C/km i 50 meters dyp over 50 % i månedene august og september. Det er også over 50 % sannsynlighet for en temperaturfront rundt Sørkapp på Spitsbergen. I tillegg til polarfronten er tidevannsfronten langs øst- og nordsiden av Spitsbergenbanken og Hopenbanken også tydelig. Øst for Storbanken og Sentralbanken er sannsynligheten for en temperaturfront betydelig mindre enn rundt Hopen dypet, og området hvor man kan observere en temperaturfront er også mye større, noe som tyder på at frontens posisjon endrer seg over tid.

$$|GradT| = \sqrt{\left(\frac{dT}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dT}{dy}\right)^2} \quad (\text{lign. 5.1})$$

Figur 5.5 indikerer mellomårlig variasjon i temperaturgradienter i 50 meters dyp, ved å vise forskjellen mellom 1989 (størst temperaturgradienter) og 2010 (minst temperaturgradienter). Dette resultatet viser at styrken på både polarfronten og tidevannsfronten kan variere betydelig mellom år - kanskje mer enn tidligere antatt. Også tidevannsfronten viser stor variasjon mellom år. Her må det imidlertid sies at tidevannsfronten også vil variere med spring-nipp syklusen (dvs. variasjonene i tidevann som skyldes månefasene, hvor tidevannet har størst amplitude ved ny- og fullmåne; Fer & Drinkwater, 2014). I tillegg er det her valgt 50 meters dyp, fordi det er det dypet som i størst grad viser temperaturfronter i området. Det at styrken på fronten også kan variere i dypet mellom år kan forklare noe av forskjellen mellom de to valgte årene.



Figur 5.4. Sannsynlighet for tilstedeværelse av temperaturfront sterkere enn $0,04 \text{ }^\circ\text{C/km}$ i 50 meters dyp i perioden august-september, 1960-2017.



Figur 5.5. Observert temperaturgradient ($^\circ\text{C/km}$) i 50 meters dyp i august-september i 1989 (venstre) og 2010 (høyre). Fargeskalaen går fra $0,04 \text{ }^\circ\text{C/km}$ (grønn) til $0,14 \text{ }^\circ\text{C/km}$ (rød)

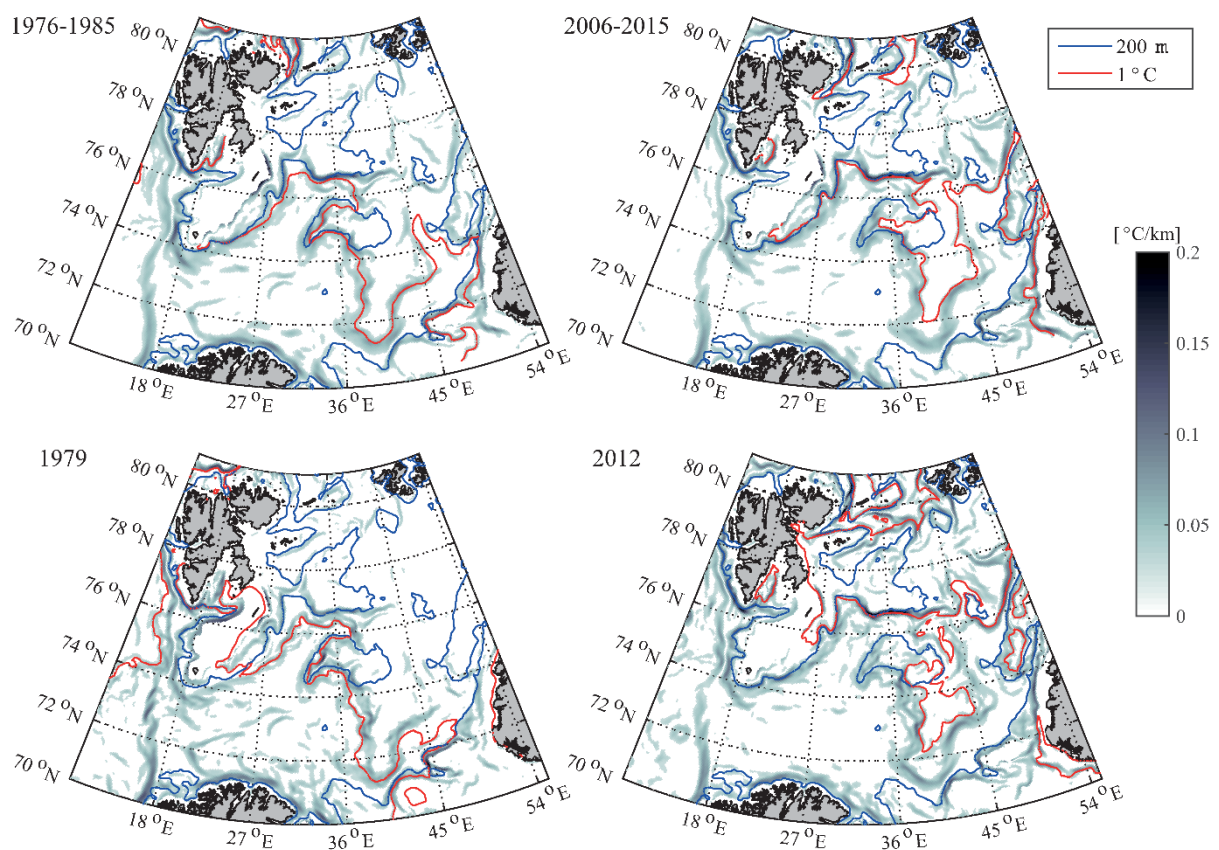
5.2.2 Numerisk modellering

I tillegg til observasjoner for å studere eventuelle forskjeller i polarfrontens posisjon på ulike tidsskalaer, er det benyttet samme metode som for observasjonsdata (lign. 5.1) for å analysere resultatene fra en regional havsirkulasjonsmodell (Regional Ocean Modelling System (ROMS); Shchepetkin & McWilliams, 2005) som dekker hele Barentshavet og omkringliggende områder. ROMS benytter terrengfølgende vertikalkoordinater, noe som gir god vertikaloppløsning i sokkelområder som Barentshavet. Modellsimuleringen som er benyttet her har en horisontaloppløsning på 4 km, noe som betyr at dynamikk og strukturer større enn ~20 km vil være godt representerte i modellen, mens dynamikk og strukturer med en størrelse på 10-20 km vil kunne være representerte. Dynamiske prosesser på mindre skala, som turbulente blandingsprosesser, er representert gjennom parameterisering i modellen (ved at resultatet av prosesser på mindre skala enn modellgitteravstanden enten blir beregnet på bakgrunn av mer storskala forhold eller direkte foreskrevet og så lagt til modellresultatene). Modellen egner seg derfor ikke spesielt godt til å se på finskala struktur og dynamikk i selve fronten, slik som ulike blandingsprosesser, men den er godt egnet til å studere frontens posisjon og generelle styrke. Simuleringen dekker perioden 1960-2017 og kvaliteten på både modellert sirkulasjon, hydrografiske forhold og isdekke er dokumentert i en rekke publikasjoner og rapporter (Lien et al., 2013a,b; Lien et al., 2014; Melsom & Gusdal, 2015; Lien et al., 2016; Lien et al., 2017). De følgende modellresultater skiller seg mao. fra modellresultatene benyttet av Oziel et al. (2016) hovedsakelig ved at de har høyere oppløsning både horisontalt og vertikalt, samt at de dekker en lengre periode (1960-2017 med høy oppløsning vs. 1979-2012 med grov oppløsning og 1997-2001 med høy oppløsning i Oziel et al. (2016)).

Modellresultatene samsvarer med observasjonene og viser at polarfronten er sterkt styrt av topografi i det vestlige Barentshavet og i områdene rundt Storbanken og Sentralbanken (Fig. 5.6). Dette gjelder både i historiske varme og kalde perioder, her representert ved hhv. gjennomsnittet for tiårsperiodene 1976-1985 og 2006-2015. Hovedforskjellen mellom ulike klimatiske regimer synes å være at polarfronten er noe sterkere og presset noe lenger opp på skråningene rundt bankene i varmere perioder sammenlignet med kalde perioder, som samsvarer med resultater basert på observasjoner hos Ingvaldsen (2005). Dette gjelder også når man ser på enkelt-år. Figur 5.6 (nede til venstre) viser modellert temperaturfront i 1979, som var et usedvanlig kaldt år, sammenlignet med temperaturfront i 2012 (nede til høyre), som var et usedvanlig varmt år i Barentshavet. I 1979 var imidlertid polarfronten både svakere og i noen områder også todelt, hvor det gikk en front omtrent langs 1 °C isoterme, i tillegg til polarfrontens posisjon langs isobaten for 200 m bunndyp. Men fronten langs 200 m isobaten er tydelig i begge år, til tross for at 1 °C isoterme var forskjøvet til 200 m isobaten i vestlige områder og også ligger betydelig lenger nedstrøms i det østlige Barentshavet i 2012 sammenlignet med i 1979. Dette er også tydelig når man ser på 10-års periodene 1976-1985 (kald periode) og 2006-2015 (varm periode), hvor plasseringen av fronten sammenfaller i begge perioder til tross for at 1 °C isoterme ligger noe høyere oppe på bank-skråningene (følger stort sett 200 m isobaten) og lenger nedstrøms i øst i den varme perioden sammenlignet med den kalde perioden. I vest, langs østsiden av Spitsbergenbanken og rundt Høpendypet, ligger imidlertid 1 °C isoterme mer eller mindre samme sted i begge perioder.

Modellresultatene og resultatene basert på observasjoner viser forskjellige resultater med tanke på mellomårlig variabilitet, ved at observasjonene indikerer større variasjoner i temperaturgradient på tvers av polarfronten mellom år enn det modellresultatene viser. Noe av grunnen kan være at modellen kan ha en tendens til å overestimere den topografiske styringen av strøm, og på den måten stramme opp gradientene på tvers av topografi i for stor grad. Det må imidlertid legges til at observasjonene er griddet, det vil si interpolert vha. statistisk interpolasjon til et rutenett med ca. 10X10 km store ruter, sammenlignet med modellresultatene

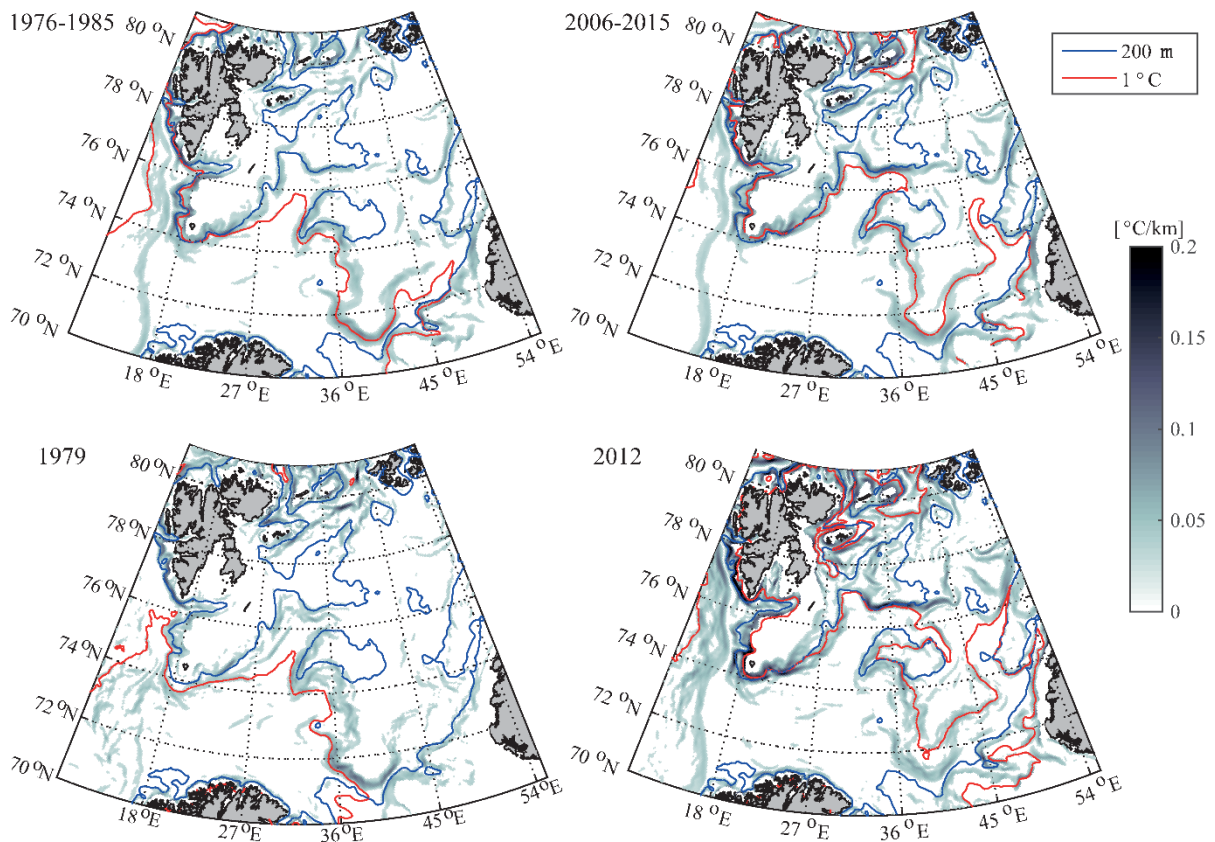
som er gitt på et rutenett med 4X4 km store ruter. Det betyr at modellen i større grad vil kunne fange opp sterke horisontale gradienter og at observasjonene kan ha en tendens til å underestimere gradientene. Videre, så representerer observasjonene kart basert på ulike punktmålinger i tid, mens modellresultatene representerer gjennomsnittet i hvert modellpunkt for en gitt periode, her kvartal. Men dette skulle tilsi at modellen i større grad enn observasjonene vil svekke gradientene ettersom mer høyfrekvent variabilitet vil gattes ut innenfor ett kvartal. En siste forskjell som kan være av betydning er at beregningene basert på observasjoner er gjort for 50 meters dyp mens det for modellresultatene er benyttet 100 meters dyp. Noe av forskjellen i mellomårlig variabilitet kan derfor skyldes mellomårlige dybdevariasjoner for kjernen av polarfronten. Modellresultater for 100 m og 200 viser imidlertid stort samsvar. Kjernen av atlantehavsvann ligger i 100-200 m dyp (Skagseth et al., 2006), og 100 m er derfor valgt i analysen av modellresultatene for å unngå innblanding av overflatevann, ettersom modellen på arktisk side har en tendens til å overdrive vertikal blanding (f.eks. Lind & Ingvaldsen, 2012).



Figur 5.6. Gjennomsnittlige modellerte temperaturgradienter ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$) på 100 meters dyp i perioden august-oktober i årene 1976-1985 (øverst, venstre), 2006-2015 (øverst, høyre), 1979 (nederst, venstre) og 2012 (nederst, høyre). Verdier lavere enn $0,025^{\circ}\text{C}/\text{km}$ er tatt bort. Blå linje viser 200 meter bunnkontur. Rød linje viser 1°C isoterm på 100 meters dyp i samme periode.

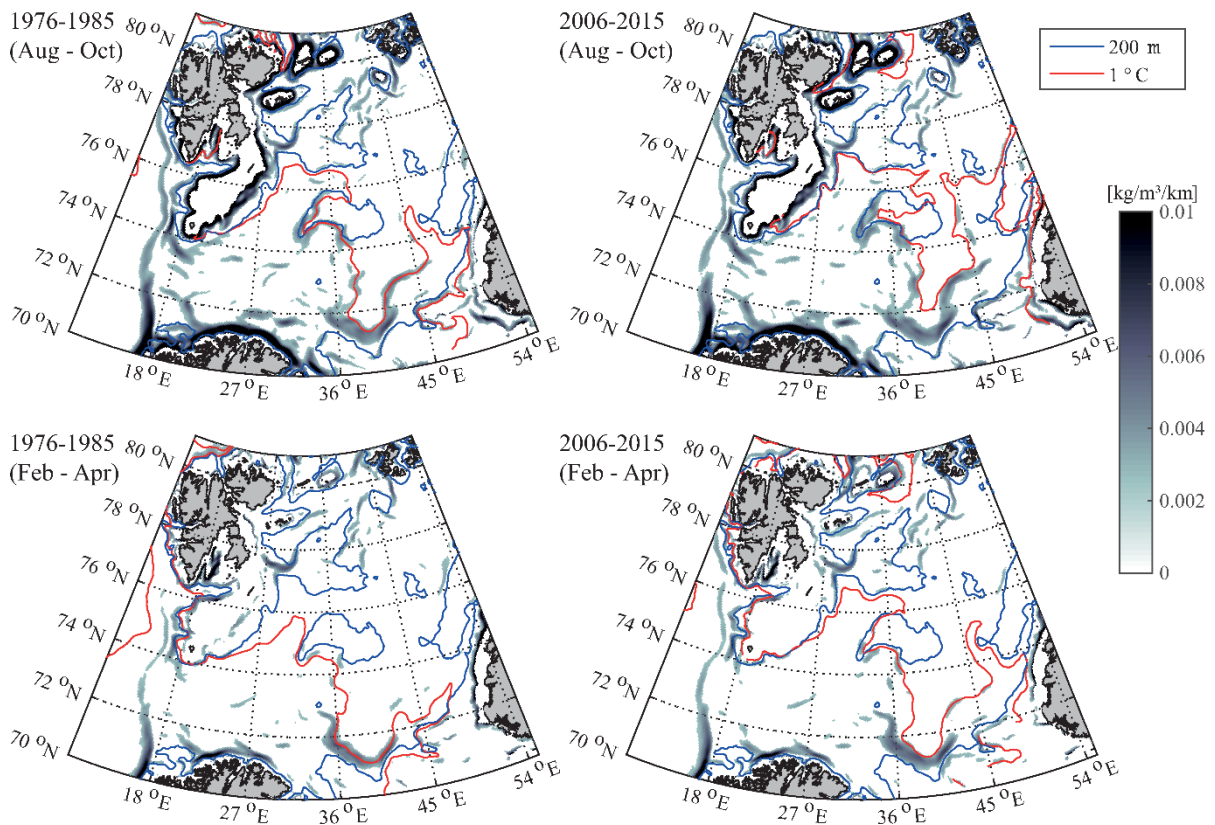
Modellresultatene viser bare små forskjeller i polarfrontens styrke og posisjon mellom sommer (Fig. 5.6) og vinter (Fig. 5.7), men posisjonen til 1°C -isotermen flytter seg nordover og østover i sommerhalvåret. Den mest tydelige sesongforskjellen finner man i tidevannsfronten på Spitsbergenbanken, hvor det ikke er noen temperaturgradienter om vinteren. Modellresultatene

viser også at tetthetsgradientene i tidevannsfronten er visket bort om vinteren. Dette resultatet er i tråd med konklusjonen til Loeng (1991), som basert på hydrografiske observasjoner fant at denne fronten bare er synlig i hydrografien i sommerhalvåret.



Figur 5.7. Gjennomsnittlige modellerte temperaturgradienter ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$) på 100 meters dyp i perioden februar-april i årene 1976-1985 (øverst, venstre), 2006-2015 (øverst, høyre), 1979 (nederst, venstre) og 2012 (nederst, høyre). Verdier lavere enn $0,025\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ er tatt bort. Blå linje viser 200 meter bunnkontur. Rød linje viser $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ isotherm på 100 meters dyp i samme periode.

I likhet med tidligere observasjoner (f.eks. Hassel et al., 1984; 1986; Fer & Drinkwater, 2014), viser også modellresultatene liten tetthetsgradient gjennom polarfronten langs vest- og nordsiden av Høpendypet ($<0.0025\text{ kg}/\text{m}^3/\text{km}$), sammenlignet med tidevannsfronten rundt Spitsbergenbanken ($>0.01\text{ kg}/\text{m}^3/\text{km}$) (Fig. 5.8). Det er imidlertid noe tetthetsforskjell langs vestsiden av Sentralbanken ($\sim 0.005\text{ kg}/\text{m}^3/\text{km}$) i begge perioder (1976-1985 og 2006-2015). Det er også noen tetthetsforskjeller i frontområdet i den sørøstlige delen av Barentshavet. Videre, så er det kun små endringer i både tetthetsgradientene ($<0.0025\text{ kg}/\text{m}^3/\text{km}$) og temperaturgradientene ($<0.025\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$) på tvers av polarfronten mellom de to ti-årsperiodene. Med andre ord endres frontens karakteristikk når det gjelder temperaturforskjell og tetthetsforskjell (eller mangel på sådan) på tvers av polarfronten lite mellom historisk varme og kalde perioder, ifølge modellresultatene. Dette til tross for at modellert temperatur på 100 meters dyp i hele Barentshavet økte generelt med mellom 0,5 og 2 grader i samme periode. Tilsvarende økning er også observert i CTD-observasjoner i august-oktober (ICES, 2017).



Figur 5.8. Gjennomsnittlige modellerte horisontale tetthetsgradienter ($\text{kg/m}^3/\text{km}$) på 100 meters dyp i sommerperioden (august-oktober) i årene 1976-1985 (øverst, venstre), 2006-2015 (øverst, høyre), og i vinterperioden (februar-april) i årene 1976-1985 (nederst, venstre) og 2006-2015 (nederst, høyre). Verdier lavere enn $0,005 \text{ kg/m}^3/\text{km}$ er tatt bort. Blå linje viser 200 meter bunnkontur. Rød linje viser 1°C isoterm på 100 meters dyp i samme periode.

5.3 Fremtidige endringer i polarfronten, tidevannsfronten og smeltevannsfronten

Ellingsen et al. (2008) tok utgangspunkt i Scenario B2 fra IPCC (2001) og brukte havmodellen SINMOD (Slagstad et al., 1990; Støle-Hansen & Slagstad, 1991; Slagstad & McClimans, 2005) for å se på utviklingen i Barentshavet fram mot 2060. De konkluderte med at det ville være små endringer i mengden innstrømmende atlantehavsvann i denne perioden, men temperaturen ville øke. Således vil mengden vann med temperatur over 1°C øke med 25 % fram til 2060. En annen viktig konklusjon fra Ellingsen et al. (2008) er at posisjonen til polarfronten vest av Sentralbanken likevel vil endre seg lite på grunn av den sterke topografiske styringen i denne delen av Barentshavet. Denne konklusjonen støttes av modellsimuleringer med havmodellen ROMS, hvor denne brukes til å nedskalere globale fremtidsscenarioer fra CMIP5 (IPCC, 2007) til regionale forhold i Barentshavet (Sandø et al., 2014). Disse resultatene viser også en tilsvarende posisjon av polarfronten i tiåret 2060-2069 sammenlignet med tiåret 2010-2019, men samtidig som temperaturen generelt i hele Barentshavet øker i samme periode.

Tidevannsfronten rundt Spitsbergenbanken og dens mulige endringer under et endret klima er ikke studert i detalj, og det er derfor ikke kjent hvordan denne vil respondere på eventuelle klimaendringer i kommende tiår. Det som imidlertid ligger fast er at tidevannsfronten dannes som en følge av kombinasjonen grunt vann (~ 50 meter bunn dyp) og sterke tidevannsstrømmer, og dette vil ikke endre seg i fremtiden. Usikkerheten knyttes følgelig til hvordan eventuelle hydrografiske endringer på Spitsbergenbanken kan endre den hydrografiske strukturen til fronten i fremtiden. Det er imidlertid liten grunn til å tro at tidevannsfronten vil slutte å eksistere

som en aktiv sommerfront i løpet av perioden som dekkes av den kommende oppdateringen av forvaltningsplanen, det vil si perioden 2020-2040.

Øst for Sentralbanken, hvor den topografiske styringen er vesentlig svakere, er det ventet at polarfronten vil fortsette å flyttes lengre nord og nordøstover ved fortsatt oppvarming, eller muligens viskes ut. Denne tendensen ser man allerede i observerte endringer fra de kaldere 1970- og 1980-årene og frem til 2000-tallet, hvor området med plussgrader har strukket seg nedstrøms med atlantehavsstrømmen nordøstover (se f.eks. Fig. 5.6 og 5.7). Dette har også bidratt sterkt til å redusere vinterisdekket i det østlige Barentshavet de siste tiår (Årthun et al., 2012; Onarheim et al., 2015; Lien et al., 2017). Videre, har dette gitt en nedgang i is-import til Barentshavet og følgelig en reduksjon i ferskvannsinholdet i det nordlige Barentshavet. Særlig har is-importen gjennom stredet mellom Novaja Semlja og Franz Josef Land vist seg å være en viktig faktor for reduksjonen i mengden arktisk vann nord for polarfronten (Lind et al., 2018). En videre reduksjon i isdekket i det østlige Barentshavet vil ytterligere svekke tilstedeværelsen av kaldt og relativt ferskt arktisk vann i det nordlige Barentshavet, og på den måten bidra til også å svekke polarfronten. Det kan tenkes at ved en ytterligere reduksjon i is-importen vil tilstedeværelsen av arktisk vann i det nordlige Barentshavet kollapse i en ikke-linjær, irreversibel respons (Lind et al., 2018). I så fall vil polarfronten kunne gjennomgå store forandringer ilt. de kommende tiår. Med redusert is-import og en mulig situasjon hvor atlantehavsvann erstatter det arktiske vannet vil sjøisen i Barentshavet forsvinne også vintertid. Følgelig vil smeltevannsfrenten kunne forsvinne i fremtiden. I nær fremtid vil likevel smeltevannsfrenten være tilstede, men varierende i styrke og posisjon avhengig av utbredelsen og mengden av sjøis i Barentshavet. Nedskalerte klimamodeller indikerer at en total kollaps i det arktiske vannet ikke er nært forestående (tidligst etter 2050), men modellenes resultater avhenger av deres evne til å gjenskape kritiske prosesser for is-import og sirkulasjon innad i det nordlige Barentshavet. Erfaring fra modellering tilsier at dette området krever høy oppløsning både horisontalt og vertikalt, i tillegg til at det er sensitivt til valg av vertikalkoordinat og parameterisering av blandingsprosesser i modellene (se f.eks. Melsom et al., 2009; Lind & Ingvaldsen, 2012; Sandø et al., 2014; Røed et al., 2015a,b; Lien & Budgell, 2018). Dette er et felt som krever ytterligere innsats for å kunne gi bedre svar på forventet utvikling frem mot 2040 og videre.

Mellom Storbanken og Hopen er topografien mindre bratt sammenlignet med langs Spitsbergenbanken og Stor- og Sentralbanken. Her tyder hydrografiske målinger på at det kan være lekkasje av atlantehavsvann fra Hopen-dypet under polarfronten og inn i Olgabassenget, spesielt om vinteren når atmosfæriske drivkrefter kan presse atlantehavsvannet høyere opp mot bankene (Lien et al., 2013; Dobrynin & Pohlmann, 2015). Også hydrografiske observasjoner under Pro Mare-toktene på 1980-tallet antydte lekkasje av atlantehavsvann fra Hopen-dypet inn i Olgabassenget. Vi har imidlertid liten kunnskap om i hvor stor grad slik lekkasje forekommer, hvor stabil polarfronten er i dette området, og om dette eventuelt vil endre seg i et endret klima. Observasjoner fra vinteren 2014 (Dobrynin & Pohlmann, 2015) antydte en større variasjon i forskjellen i vannmassekarakteristikker til atlantehavsvann fra hhv. det sørvestlige og det nordlige Barentshavet enn data fra tidligere perioder antydte (Lind & Ingvaldsen, 2012). Dette vil imidlertid være et fokusområde for prosjektet Arven etter Nansen, og det er ventet at vi vil få betydelig ny kunnskap som kan besvare spørsmål knyttet til polarfrontens stabilitet eller mangel på sådan i dette området, som igjen kan gi informasjon om hvordan polarfronten kan ventes å respondere på fremtidige klimaendringer her. Renna mellom Storbanken og Sentralbanken er et annet område hvor atlantehavsvannets utbredelse varierer som en direkte respons på variasjoner i innstrømmingen til Hopen-dypet (Lien et al., 2013). Også her har vi begrenset med kunnskaper om hvor stabil polarfronten er i dette området og hvordan dette eventuelt påvirker/henger sammen med de hydrografiske forholdene oppe på bankene, og da

spesielt Sentralbanken, og videre implikasjoner for primær- og sekundærproduksjon på og rundt Sentralbanken.

Ved bruk av ROMS-modellen kom Førland et al. (2009) frem til at polarfrontens posisjon vil være noenlunde stabil rundt Spitsbergenbanken og ved Storbanken hvor topografien er styrende. Samtidig antyder Førland et al. (2009) at atlanterhavsvann vil overta på Sentralbanken midt i dette århundret, og videre at det arktiske vannet også kan forsvinne over Spitsbergenbanken. Ettersom sommerfronten oppe på Spitsbergenbanken er et resultat av sterke tidevannsstrømmer over et grunt område, vil denne fronten kunne opprettholdes også i et endret klima med endrede, lokale hydrografiske forhold.

Alle disse modellstudiene indikerer at temperaturen vil komme til å stige generelt i hele Barentshavet, på begge sider av polarfronten og tidevannsfronten, men at temperaturgradienten vil fortsette å være topografisk styrt rundt Hopen, og derfor endre seg lite både med tanke på styrke og posisjon, i første halvdel av det 21. århundre. Videre, er det ventet at tidevannsfronten høyere oppe på Spitsbergenbanken også vil vedvare som en aktiv sommerfront i første halvdel av det 21. århundre.

5.4 Kunnskaps- og overvåkningsbehov

Som oversikten over publiserte resultater viser, antydes det at polarfronten responderer på endringer i hydrografiske forhold, spesielt i østlige deler av Barentshavet. Videre, er det mulig at polarfrontens posisjon også vil kunne endres vesentlig i vestlige deler av Barentshavet, dvs. rundt Hopen og Sentralbanken, mot slutten av inneværende århundre (Wassmann et al., 2015), eller tidligere (Lind et al., 2018). Det er imidlertid usikkert hvordan en slik endring vil kunne arte seg både i tid og rom og hvor stor perturbasjon fra dagens klimatiske tilstand som vil kreves for å sette i gang en slik endring. Spørsmål som gjenstår å besvares, og som vil påvirke verdi- og sårbarhetsvurderingen av polarfrontområdet og dermed er viktige i den fremtidige forvaltningen av polarfronten spesielt og Barentshavet generelt, inkluderer:

- Vil polarfrontens stabilitet i rom og tid endres i et varmere klima?
- Hvordan vil en endret ferskvannssyklus påvirke polarfronten? Vil den fortsatt være tetthetskompenserende, eller vil fremtidige endringer gi opphav til økt primærproduksjon i polarfrontområdet?
- Vil temperaturen endres tilsvarende på begge sider av polarfronten i et endret klima, eller vil forskjellig oppvarming i sør og nord kunne gi opphav til økte tetthetsgradienter i polarfronten?
- Hvordan vil koblingen mellom polarfronten og smeltevannsfronten i overflatelaget endres i et varmere klima med et endret isdekke og ferskvannssyklus?
- Hvor store endringer i regionalt klima må til for at polarfronten forskyves vesentlig i vest, hvor raskt vil eventuelt en slik forskyvning skje og vil en slik endring være reversibel, dvs. vil polarfronten gå tilbake til historisk posisjon dersom drivkreftene som forflytter den midlertidig endres?
- Vil tidevannsfronten opprettholdes i samme grad som i dag dersom temperatur og sjøisforholdene på Spitsbergenbanken og omkringliggende områder endres vesentlig?

6 Næringsalter

Plankton stiller de samme krav til næring som planter på land og det er de samme næringsstoffene som er viktige. Nitrat (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) og urea (NH_4CONH_2) er de viktigste næringssaltene, samt fosfat (PO_4^{3-}). Silikat (SiO_3^{2-}) er dessuten nødvendig for vekst av kiselalger (Sakshaug et al., 1994).

Konsentrasjonen av næringsalter i en bestemt vannmasse er til enhver tid en funksjon av differansen mellom tilførsel og forbruk. Om høsten og vinteren tilføres næringsalter nedenfra til overflatelagene gjennom vertikalblanding. Sprangsjiktet som dannes utover våren og sommeren isolerer algene i den lys-intensive sonen og legger dermed grunnlaget for en positiv netto primærproduksjon, men det isolerer samtidig overflatelaget fra det næringsrike vannet under. Etter hvert som algeblomstringen utvikler seg, brukes derfor næringssaltene i overflatelaget helt eller delvis opp (Sakshaug et al., 1994), selv om det også foregår en viss regenerering av næringsalter i dette laget.

Innholdet av næringsalter viser vanligvis en økning i dypvannet. Denne økningen er som oftest mer markert for silikat enn for nitrat. Dette har sammenheng med den ulike innflytelse av biologiske og kjemiske prosesser på disse to næringssaltene. Silikat forbrukes i hovedsak bare av diatomeer og brukes til å danne kiselkallet hos disse algene. Silikat blir derfor i sterkere grad enn nitrat påvirket av vertikal sedimenteringsfluks av partikler og remineralisering på eller nær bunnen.

I aktive frontsystemer foregår det oppstrømning av vann i overgangen mellom ulike vannmasser, og næringsalter fraktes dermed fra dypet opp til overflaten. Som beskrevet under polarfrontens fysikk, så er denne, dynamisk sett, en passiv front hvor det ikke i vesentlig grad foregår slike oppstrømninger (Fer & Drinkwater, 2014). Derfor blir næringssaltene brukt opp i overflatelaget også i polarfronten, slik at man ikke får noen høyere produksjon her enn i omkringliggende områder (Erga et al., 2014). Imidlertid påpeker Fer & Drinkwater (2014) at blandingsprosessene hvor atlantehavsvann og arktisk vann flyter inn i hverandre (fletting) i polarfronten, kan føre til en «lekkasje» av næringsalter fra atlantehavsvannet og over til arktisk side, hvorpå disse næringssaltene blandes opp via prosessene i de to andre frontene (smeltevannsfronten og tidevannsfronten) rundt Spitsbergenbanken. På denne måten kan polarfronten likevel bidra indirekte til økt produksjon i området.

Resultatene som viser polarfronten som en passiv front er også understøttet av tidligere resultater fra undersøkelser under programmene «lodka på sommerbeite» (1979-1983) og «Pro Mare» (1985-1989), se f.eks. oppsummeringer i Skjoldal et al., 1987; Rey et al., 1987; Skjoldal & Rey, 1989. I 1984 observerte man en intens oppblomstring over Spitsbergenbanken og på arktisk side av polarfronten om våren (mai), mens konsentrasjonen av klorofyll-*a* var lav om høsten (august) etter at næringssaltene var uttømt (Hassel et al., 1984). Videre, ble det også observert høy biologisk aktivitet på arktisk side av polarfronten, mens i polarfronten var situasjonen i mai typisk for en sen fase i oppblomstringen i overflatelaget. Under 20 meters dyp ble det imidlertid rapportert om tilsynelatende oppstrømning av næringsrikt vann, mens det på atlantisk side av polarfronten var en situasjon typisk for våroppblomstringen med høye klorofyll-*a* verdier og en klar vertikal gradient i næringssaltkonsentrasjonene (Hassel et al., 1984). Denne oppstrømningen kan ha sammenheng med de kompliserte hydrografiske forholdene som ga opphav til svake, horisontale tetthetsgradienter i polarfronten i mai 1984, som beskrevet i Kapittel 5.1.2. Figurene A7 og A8 viser resultater fra undersøkelser på tvers av polarfronten opp mot Storbanken i juni 1983 (Gjøsæter et al., 1983). Her ble polarfronten observert som en skarp front med en tydelig signatur i temperatur og saltholdighet men uten noen klar signatur i tetthet. Imidlertid var det en tydelig smeltevannsfront ca. 15 nm sør for polarfronten. Videre, viste observasjoner av næringsalter og klorofyll-*a* at blomstringen var

over sør for polarfronten, mens oppblomstringen pågikk i den marginale issonen. Inne i de isdekte områdene var våroppblomstringen ennå ikke kommet i gang. Det ble ikke funnet tegn til forhøyet produksjon i polarfronten i dette området i 1983, i likhet med de andre årene i perioden 1979-1984.

I smeltevannsfronten og tidevannsfronten, som begge er dynamisk sett aktive og eksisterer rundt Spitsbergenbanken i sommerhalvåret, viser målinger en til tider særdeles høy grad av vertikal blanding og følgelig også fluks av næringsalter fra dypere lag og opp mot overflaten (Fer & Drinkwater, 2014), så lenge det fremdeles er næringsalter tilgjengelig i lagene under. Dette gir opphav til en intens våroppblomstring på og rundt Spitsbergenbanken. Fer & Drinkwater (2014) presenterer riktignok kun målinger fra ett år, men som forklart i Kapittel 5.1.1 vil tidevannsfronten være tilstede hvert år på samme sted, ettersom drivkraften bak tidevannsfronten (grunt vann og tidevannsstrømmer) ligger fast. Videre, så er også smeltevannsfronten tilstede hvert år, men dens styrke og posisjon er knyttet til smelting av sjøis og vil derfor variere mellom år.

Målinger viser minkende konsentrasjoner av silikat i det nordlige Atlanterhavet (Hátún et al., 2017) og en nedgang på ~20% i atlantehavsvannet som strømmer inn i Barentshavet, noe som igjen medfører igjen en nedgang på ~25-30% i tilgjengelig silikat for diatomeer (Rey, 2012). Dette vil kunne ha en betydelig påvirkning på primærproduksjonen i Barentshavet, inkludert polarfrontområdet, ved at mengden diatomeer vil avta, samtidig som andre former, som flagellater, vil kunne nyttiggjøre seg tilgjengelig nitrat og øke i mengde. Dette vil kunne gi endrede næringsveier i de nederste delene av næringskjeden. Bl.a. observerte Skjoldal & Rey (1989) stor mellomårlig variasjon i forholdet mellom nitrat og silikat under og etter våroppblomstringen i polarfrontområdet, og som de tolket som en effekt av beiting fra kopepoder, i hovedsak *Calanus*-arter, ettersom kopepoder fortrinnsvis beiter på diatomeer (Estep et al., 1990). I perioder med store kopepode-bestander vil det være relativt sett færre diatomeer g dermed også mer gjenværende silikat og dermed et lavere nitrat/silikat-forhold.

6.1 Kunnskaps- og overvåkningsbehov

Det er viktig å opprettholde dagens overvåkning av konsentrasjoner av næringsalter både internt i Barentshavet og i vannmassene som renner inn i Barentshavet, spesielt med tanke på de observerte endringene i mengden silikat i atlantehavsvannet oppstrøms av Barentshavet.

I tillegg er det et betydelig kunnskapsbehov når det gjelder fluks av næringsalter i forbindelse med blandingsprosessene forbundet med de ulike frontene i hele polarfrontområdet, som beskrevet over. Bedre kunnskap om dette vil gi forbedrede produksjonsestimater for området.

Mer kontinuerlig overvåkning gjennom året vil også gi bedre kunnskap angående sesongvariasjoner i næringsaltkonsentrasjoner, samt variasjoner mellom år som følge av endringer i bl.a. ytre påvirkning som blanding som følge av vind, varierende posisjon og tidsmessig utvikling samt styrke på spesielt smeltevannsfronten, men også eventuell sesongvariasjon og variabilitet mellom år i fluks gjennom polarfronten vil være av betydning for bedre å kunne beregne budsjetter for produksjon i polarfrontområdet.

7 Primær og sekundærproduksjon

7.1 Planteplankton

Økt primærproduksjon er et trekk som ofte er knyttet fronter i havet fordi man her har økt tilførsel av næringsalter. For eksempel har økt primærproduksjon blitt observert i fronter knyttet til store virvler og forårsaket av oppstrømning av næringsrikt vann fra dypere lag (Lochte & Phannkuche, 1987; Nelson et al., 1989; Godø et al., 2012). Også fronter langs skråninger og tidevannsfronter kan medføre økt tilførsel av næringsalter til de øvre vannlag og dermed gi økt primærproduksjon (Le Fèvre, 1986; Belkin et al., 2009). Slagstad & Stokke (1994) indikerte ved modellering at dette også gjelder polarfronten i Barentshavet. Under Pro Mare (1984 – 1989) og årene før da Havforskningsinstituttet gjennomførte prosjektet «Lodda på sommerbeite» (1979-1983), var det imidlertid ikke klare tegn til økt primær- eller sekundærproduksjon i polarfronten (se Appendix, Fig. A7, A8, samt Rey et al., 1987; Skjoldal et al., 1987; Skjoldal & Rey, 1989). Derimot var oppblomstringen tydelig påvirket av isutbredelsen og posisjonen til smeltevannsfronten, som i dette tilfellet (Appendix, Fig. A7, A) var lokalisert ca. 15 nm sør for polarfronten, ved at man kan følge en gradient fra post- til pre-blomstring fra atlantehavsvannet i sør, gjennom smeltevannsfronten og til det isdekte arktiske vannet i nord. Denne sesongmessige utviklingen, hvor oppblomstringen styres av og følger iskantsonen og smeltevannslaget forbundet med denne, etter hvert som iskantsonen trekker seg nordover, er beskrevet i mer detalj i iskantsonerapporten (von Quillfeldt et al., 2017).

Også nyere modellresultater (bl.a. Wassmann et al., 2006) og feltstudier indikerer at polarfronten i Barentshavet, på grunn av svake horisontale tetthetsgradienter, ikke forårsaker oppstrømning eller en sekundær sirkulasjon (Fer & Drinkwater, 2014) og at det derfor heller ikke er dokumentert en økt primærproduksjon i polarfronten (Reigstad et al., 2011; Erga et al., 2014). Det må imidlertid understrekes at feltobservasjonene er av kortvarig karakter, og at det ikke har vært detaljerte studier av satellittbilder (Børsheim & Drinkwater, 2014).

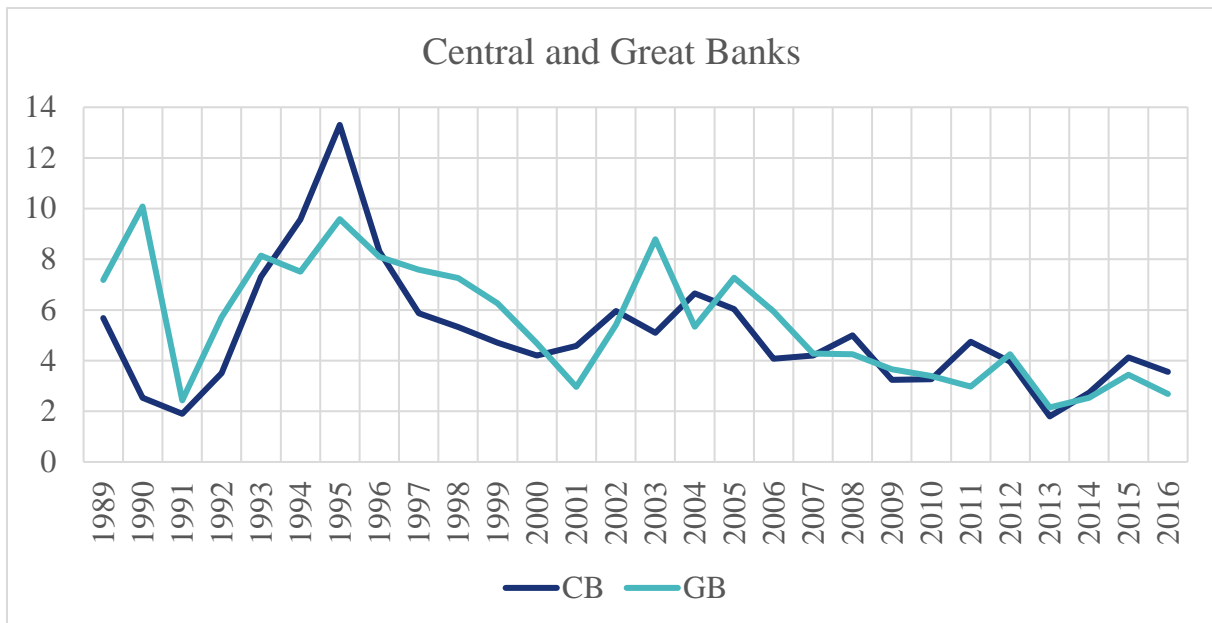
Børsheim & Drinkwater (2014) studerte satellittbilder for perioden 1998-2009. Med unntak av 2007, fant de at primærproduksjonen i polarfronten ikke var tydelig høyere enn i de omliggende områdene. I 2007 fant imidlertid Børsheim & Drinkwater (2014) at primærproduksjonen i polarfronten var 30 % høyere sammenlignet med omliggende områder. De argumenterte videre for at den økte produksjonen ikke kunne forklares gjennom fysiske egenskaper ved fronten, som for eksempel oppstrømning av næringsalter. Konklusjonen at økt primærproduksjon i polarfronten i 2007 ikke skyldtes fysiske egenskaper ved fronten var basert på observasjoner av fysiske forhold våren 2008 (Fer & Drinkwater, 2014). En modellstudie av områdene rundt Spitsbergenbanken og Hopen dypet indikerte imidlertid at de fysiske forholdene langs skråningen av Spitsbergenbanken, og dermed også i polarfrontområdet, var forskjellige i 2007 sammenlignet med 2008, spesielt på arktisk side av polarfronten. Videre ga modellstudien indikasjoner på at forholdene i 2008 favoriserte en tidligere start på oppblomstringen i området mellom tidevannsfronten og polarfronten i forhold til områdene rundt, sammenlignet med 2007, ved at tettere bunnvann fra isdannelse oppe på banken bidro til lagdeling lenger ute på skråningen og som er nødvendig for å få netto primærproduksjon (Lien & Ådlandsvik, 2013, 2014).

7.2 Dyreplankton

For dyreplankton representerer polarfronten grense mellom varme atlantiske og kalde arktiske habitater for ulike arter. De to dominerende artene av dyreplankton i polarfrontområdet er *Calanus finmarchicus* på atlantisk side og *Calanus glacialis* på arktisk side (Søreide et al., 2003; Aarflot et al., 2017). Disse to artene har henholdsvis ett-årig og to-årig livssyklus, og de reproduserer om våren med eggproduksjon avhengig av mat (energi) fra den begynnende algeproduksjonen (Melle & Skjoldal 1998; Søreide et al., 2010). På grunn av den lange generasjonstiden for disse kopepodene (hoppekreps) og utveksling og blanding av vannmasser, utgjør ikke polarfronten et absolutt og skarpt skille mellom artene. Det er heller slik at *C. finmarchicus* fra sør og *C. glacialis* fra nord møtes og blandes i en bredere frontzone. Her spiller horisontal adveksjon en viktig rolle, bl.a. ved at atlantisk vann med *C. finmarchicus* strømmer nordover under det arktiske vannet i polarfronten i det nordlige Hopen-dypet, samt ved fletting av vannmasser langs Spitsbergenbanken (som beskrevet over).

Melle og Skjoldal (1998) fant at eggproduksjonen hos *Calanus*-artene kunne starte tidlig i polarfront området drevet av en tidlig oppblomstring av planteplankton ved iskanten, og *C. glacialis* kan også beite på isalger som blomstrer under isen 1-2 måneder før den pelagiske oppblomstringen (Søreide et al. 2010). Dette betinger en sørlig utbredelse av vinter-is, som ofte var sammenfallende med polarfronten i det kaldere klimaet på 1980-tallet. *Calanus finmarchicus* reproduserer forsinket og dårlig i de kalde arktiske vannmassene og blir 'ekspatriert' (uten å være i stand til å reprodusere) når den transporteres gjennom det nordlige Barentshavet mot Polhavet (Melle & Skjoldal, 1998, Kosobokova & Hirche, 2009).

Dyreplanktonbiomasse (målt som tørrvekt på de omfattende norsk-russiske høsttoktene) har vist en nedadgående trend for Sentralbanken og Storbanken (Fig. 7.1). Ved begynnelsen av tidsseriene på slutten av 1980-tallet var disse bankene arktiske og planktonet dominert av *C. glacialis* (Skjoldal & Rey, 1989). Den kraftige nedgangen i dyreplanktonbiomasse gjenspeiler derfor en stor nedgang i mengden av *C. glacialis* på disse bankene, som ligger like nord for polarfronten. Mulige årsaker er økt beiting fra lodde og andre fisk pga. mindre is og lengre beitesesong. Storbanken har vært et tradisjonelt og viktig beiteområde for lodde når den vandrer nordover for å beite om sommeren. Endringer i fysiske forhold kan også ha spilt en rolle ved å endre adveksjon og påfyll av *C. glacialis* fra områdene i det nordlige Barentshavet. Samtidig som mengden *Calanus* spp. har avtatt i de sentrale deler av Barentshavet, har mengden krill og maneter økt generelt i hele Barentshavet, inkludert i deler av polarfrontområdet, sannsynligvis som en følge av økte temperaturer (Eriksen & Dalpadado, 2011; Dalpadado et al., 2012; Eriksen et al., 2012; ICES, 2017). Økningen i biomassen av lipid-rike krill har gitt gode vekstforhold for arter som lodde og torsk, mens reduksjonen i arktisk zooplankton, som *C. glacialis*, har negative implikasjoner for polartorsk og andre zooplanktonspisere i det arktiske næringsnett (Dalpadado et al., 2012).



Figur 7.1. Gjennomsnittlig biomasse av dyreplankton (g tørrvekt m⁻²) på Sentralbanken (CB) og Storbanken (GB) målt på de felles norsk-russiske høsttoktene fra 1989 til 2016. Fra Skjoldal et al. i ICES 2018.

7.3 Kunnskaps- og overvåkningsbehov

De bakenforliggende mekanismene som styrer variasjoner i planktonmengde og sammensetning i Barentshavet er ikke godt nok forstått. For polarfrontområdet gjelder spesielt forståelsen av biofysiske sammenhenger som variasjoner i havsirkulasjonen i det sentrale Barentshavet og betydningen for fordeling av plankton, inkludert årsakssammenhengen bak den observerte nedgangen i dyreplankton over Stor- og Sentralbanken. I tillegg er det behov for videre overvåkning av og økt kunnskap om konsekvensene av redusert mengde silikat på primærproduksjon og endringer i næringsvei oppover i de trofiske nivåer. Videre, er det behov for økt kunnskap om hvordan økt temperatur på begge sider av polarfronten påvirker planktonsamfunnets sammensetning og funksjon og hvordan eventuelle endringer i koblingen mellom polarfronten og smeltevannfronten i overflatelaget på den arktiske siden av polarfronten vil påvirke tilgangen på næringsalter og følgelig også primærproduksjon (som endringer i tidspunkt, sammensetning og total produksjon) og sekundærproduksjon (endring i tidspunkt, samfunn og funksjon, samt næringsverdi).

8 Fisk

Totalt er det mellom 150-180 fiskearter i Barentshavet (Karamushko, 2008; Christiansen & Reist, 2013), og av disse observeres rundt 100 arter regelmessig under forskningstokt. En ukjent andel av disse har et utbredelsesområde som strekker seg inn i polarfronten, enten fra den arktiske siden eller fra den atlantiske siden. For de kommersielt viktige fiskeartene i Barentshavet utgjør polarfronten først og fremst en del av deres beiteområde, og i noen grad også oppvekstområde. I tillegg finnes det ikke-kommersielle arter som har hele eller deler av sin livssyklus her. Mange arter har stor sesongmessig variasjon i den geografiske fordelingen gjennom året. Fiskebestandene i polarfrontområdet undersøkes med bunntål, pelagisk trål og akustiske målinger under det norsk-russiske økosystemtoktet i august-september, i tillegg til en del undersøkelser til andre årstider, spesielt i februar-mars. De siste 10-15 år har fordelingen av mange boreale arter strekt seg mot nord og øst (f.eks. Fossheim et al., 2015). En oversikt over utbredelsen til ulike fiskebestander i Barentshavet både om vinteren og høsten finnes i HIs fiskeatlas (Wienerroither et al., 2011, Wienerroither et al., 2013).

En sammenstilling av alle arter fanget med bunntål under økosystemtoktene i perioden 2004-2014, dvs. demersale fiskearter, viste at hele det nordvestlige Barentshavet har mange felles arter, selv om det er en klar forskjell med flere varmekjære arter sør for polarfronten og hovedsakelig mer arktiske arter nord for polarfronten på Spitsbergenbanken (Bergstad et al., 2017). Videre viste dataene en overraskende stor artsrikdom på Spitsbergenbanken tatt i betraktning at dette er området i det nordvestlige Barentshavet som opplever den største sesongmessige temperaturforskjellen ved bunnen.

Polarfronten fungerer som en habitatsgrense for en del arter, men likevel med en del «lekkasje», dvs. noen arter vandrer gjennom fronten, bl.a. som en del av beitevandringen, ved at fisk beiter på ulike dyreplankton av ulik størrelse på hver side av fronten. Lodda (*Mallotus villosus*) overvintrer i området rundt polarfronten, og man har observert unglodde som beiter på mindre dyreplankton på atlantisk side av fronten samtidig som større og eldre lodde beiter på større dyreplankton på den arktiske siden av fronten om våren (Drinkwater, upubliserte data). Tilsvarende selektiv beiting er også tidligere funnet blant torsk (*Gadus morhua*; Woodhead & Woodhead, 1959). Dette kan være noe av årsaken til at lodda oppsøker polarfrontområdet og bruker den som sitt overvintringsområde. Selv om polarfronten ikke representerer økt primærproduksjon, kan det likevel tenkes at den adveksjonen som foregår fra områder rike på arter som *C. glacialis* lenger nord bidrar til å likevel gjøre polarfrontområdet til et aggregeringsområde for ulike arter dyreplankton og dermed også et viktig beiteområde for enkelte arter. Adveksjonen av arktiske vannmasser som fører med seg arktiske bytterdyrarter går forbi Hopenbanken, langs Spitsbergenbanken og videre rundt Bjørnøya og Storfjordenrenna. I tillegg kan det at polarfronten er en habitatsgrense bidra til variasjon i byttedyrtilgangen, som igjen gjør dette området til et foretrukket beiteområde for enkelte arter. Torsk vil, i perioder når bestanden er stor, bruke det meste av Barentshavet, inkludert polarfrontområdet, under sin beitevandring i sommermånedene.

8.1 Kunnskaps- og overvåkningsbehov

Det er fortsatt usikkert hvorvidt ulike fiskearter bruker polarfronten mellom atlantehavsvann og arktisk vann aktivt som vern mot mer varmekjære predatorer, og om polarfronten også benyttes aktivt i beitingen, ved at fisken oppsøker de forskjellige sidene av fronten i jakt på plankton av forskjellig størrelse og livsstadium. Dersom dette er tilfelle vil polarfronten ha en vesentlig biologisk verdi og sårbarhet overfor negativ påvirkning i hele eller deler av året, til

tross for at selve polarfronten ikke bidrar til økt primær- og sekundærproduksjon. Videre, vil det være et spørsmål om dette i så fall også vil være tilfelle dersom vannmassene på den ene eller begge sider av fronten endres (f.eks. blir varmere), samtidig som fronten fremdeles er lokalisert i samme område. Og hvordan vil eventuelle endringer i vannmassene endre planktonsammensetningen i frontområdet og vil det i så fall påvirke de ulike artenes beitemønstre?

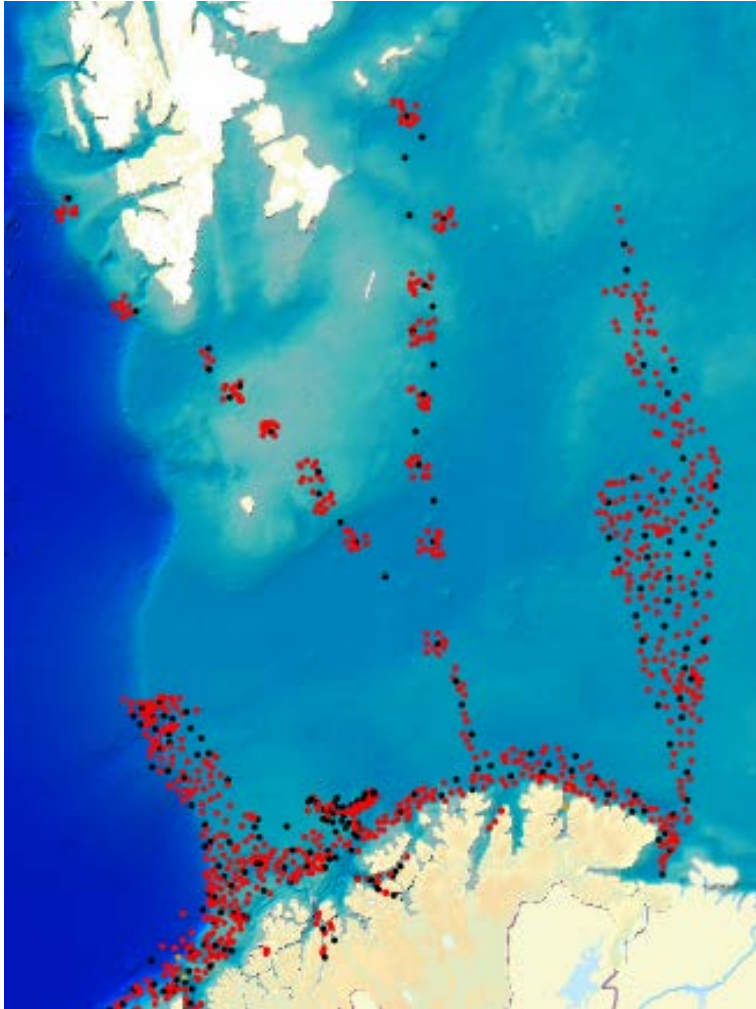
9 Bunnsamfunn

En oppsummering av generell kunnskapsstatus på bunnsamfunn i Barentshavet, med et fokus på området som dekkes av iskantsonen, er gitt i del-rapporten «Miljøverdier og sårbarhet i iskantsonen» (von Quillfeldt et al., 2017). Vi gir her et sammendrag og med fokus på polarfrontområdet, før det suppleres med ny og mer detaljert kunnskap på artsnivå, som er kommet til i etterkant.

Megabenthos i Barentshavet er dominert i biomasse av svamper (Porifera) i vest, pigghuder (Echinodermata) i nordøst, krepsdyr (Crustacea) i nord og i øst, og nesledyr (Cnidaria) i nordøst. Fordelingen av bunndyr reflekterer gradienten fra varmt atlantehavsvann i sør og vest til arktiske vannmasser i nord og øst (Anisimova et al., 2010, 2011; Jørgensen et al., 2015a, 2015b). Skillet mellom de svampe-dominerte og pigghud-dominerte områdene følger delvis polarfronten, med bunndyrsamfunn med høy temperaturpreferanse og bred toleranse sør for polarfronten og bunndyrsamfunn med lav temperaturpreferanse og smal toleranse nord for polarfronten. Det er også en gradient i dypet, hvor bunnsamfunnet har lavere og smalere temperaturpreferanse og -toleranse i dype områder og høyere og bredere temperaturpreferanse og -toleranse på grunne områder/banker. Hopenlypet har mindre biomasse enn Spitsbergenbanken, men antall arter (små individer) er høyt også i Hopenlypet. Oppå og langs sidene av Spitsbergenbanken og Sentralbanken er det også et relativt høyt antall større arter.

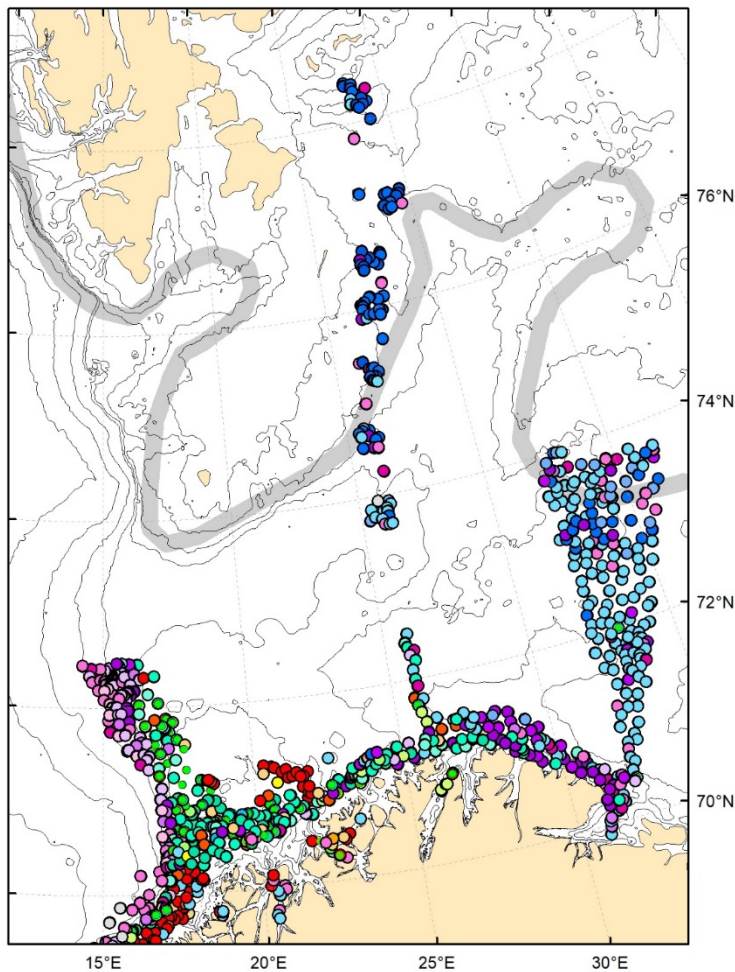
Skillet mellom dominans av boreale arter og dominans av mer arktiske arter går lenger sør enn polarfronten i Hopenlypet. Grunnen til dette er sannsynligvis midlertidige hendelser hvor kaldt vann dannet ved isfrysing oppe på bankene renner langs skråningene på bankene og ned mot bunnen av Hopenlypet og at bunndyrene i dette området derfor må være mer tolerant overfor lave temperaturer enn lenger sør i de atlantisk-dominerte områdene (Jørgensen et al., 2015).

MAREANO har samlet inn materiale for kartlegging av biomangfold, samfunn og naturtyper i Barentshavet over flere år (Fig. 9.1), men samlede fremstillinger av resultater fra analyser av artssammensetning og naturtypefordeling blir først nå tilgjengelige i nær fremtid. Her rapporteres det først også fremst basert på observasjoner gjort i felt.



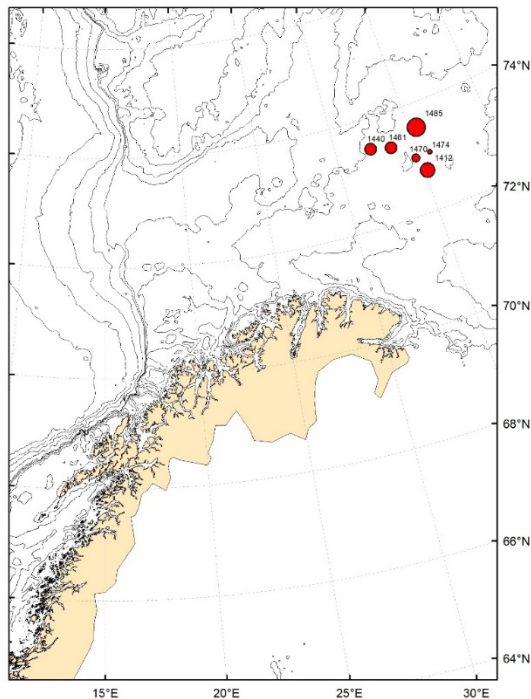
Figur 9.1. MAREANO har samlet inn materiale for kartlegging av biomangfold, samfunn og naturtyper i Barentshavet over flere år. De røde punktene angir lokaliteter hvor havbunnen er filmet, mens de sorte punktene angir lokaliteter hvor det i tillegg har blitt tatt bunnprøver med ulike redskap.

En analyse av artssammensetning observert med videoutstyr fram til 2016 indikerer at det er et tydelig skille mellom områder nord og sør for polarfronten (Fig. 9.2). Disse resultatene er basert på registreringer av arter gjort i felt under filming av havbunnen. De detaljerte resultatene fra videoanalyse utført etter tokt er enda ikke samlet i en tilsvarende analyse. I nær fremtid vil MAREANO kunne presentere mer detaljer for utbredelse av arter og samfunn. Modellerte biotopkart vil også bli presentert.



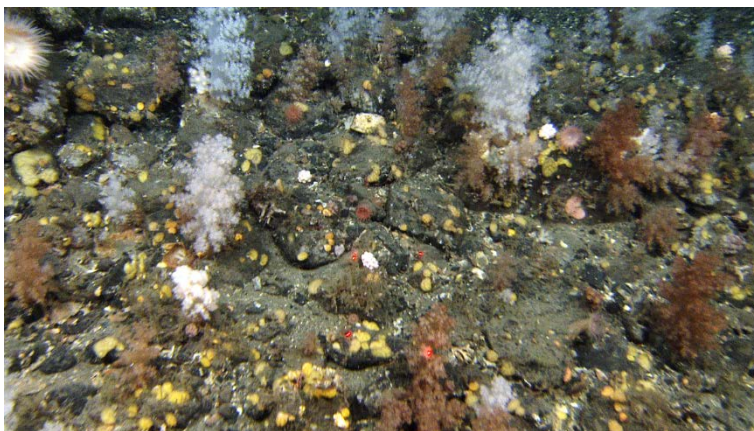
Figur 9.2. Fordeling av bunndyrsamfunn basert på MAREANOs observasjoner i felt til og med 2016. Grupper er identifisert med TWINSpan analyse er angitt med ulike farger. Polarfronten, som oppgitt i forvaltningsplanen, er indikert med et grått felt.

Sør for Sentralbanken, på den atlantiske siden av polarfronten er det gjennom MAREANO-programmet nylig innsamlet store forekomster av *Haploops*-samfunn på Thor Iversen-banken (Fig. 9.3). De vanligste artene er *H. tubicola*, men også *H. similis* er registrert, og innsamlingene viser en tetthet på 100-300 individer per m². Utbredelsen av dette samfunnet i Barentshavet er lite kjent, og det er for tiden under utredning i OSPAR hvorvidt dette habitatet skal vurderes som truet, ettersom det foregår stor fiskeriaktivitet med bunntål i området hvor *Haploops*-samfunnene er registrert (Buhl-Mortensen & Buhl-Mortensen, 2018).



Figur 9.3. Kart over MAREANO-stasjoner hvor de største forekomstene av Haploops er registrert. Dette er høy-produktive områder rett sør for polarfronten.

Det er store forskjeller i artssammensetning og naturtyper mellom områdene lenger sør og vest i MAREANOs kartleggingsområde. Korallrev har sin nordligste utbredelse like nord for Sørøya, mens hornkorallene *Paragorgia*, *Primnoa* og *Paramuricea* (disse kan danne korallskoger på hardbunn) strekker seg østover langs Finnmarkskysten. Selv om det er rapportert enkelte funn av sjøtre i østlig del av Barentshavet, ser hardbunns-korallskoghabitat ut til å være fraværende i sentrale og nordlige deler av Barentshavet. Blomkålskoraller (*Drifa*, *Duva* og *Gersemia*) er vanlige i store deler av Barentshavet. Der disse opptrer tett kan vi kalle habitatet for blomkålskoralleng (Fig. 9.4).

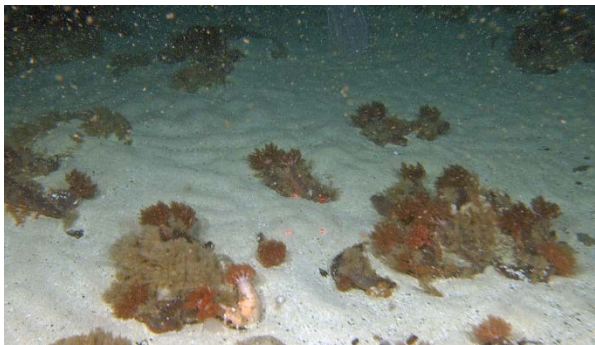


Figur 9.4. Blomkålskorallenger er vanlige i Barentshavet.

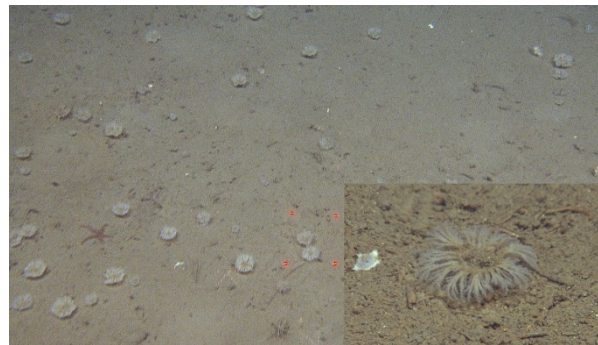
Av andre organismegrupper som er ansett som sårbare er sjøfjær og grisehalekoraller. Grisehalekorall (*Radicipes gracilis*) har MAREANO kun registrert sydvest i Barentshavet i

bjørnøyarasområdet mellom Bjørnøya og fastlands-Norge. Sjøfjær av ulike arter har en bred utbredelse i Barentshavet. En av sjøfjærene, *Umbellula encrinus* opptrer grunnere lenger nord enn sør i Norskehavet. Den er ikke observert på noen av MAREANO sine kartleggingsstasjoner, men er blitt observert som bifangst i bunntålprøver på Havforskningsinstituttets overvåkningstokt nord for Svalbard.

Flere steder har MAREANO oppdaget karakteristiske sammensetninger av arter hvor noen få er dominerende «nøkkelarter». På Spitsbergenbankens platå forekommer det tette bestander av brunpølsen *Cucumaria frondosa* sammen med en buskformet bryozo (mosdyr) og hydroider, på skjellgrus mellom 30 og 50 m dyp (Fig. 9.5). Vannet var her (om sommeren) opp mot 5 °C varmere enn på de dypere kantene av Spitsbergenbanken, og strømmen var sterk (1,5 meter per sekund). I dette området er dyrene konsentrert til øyer av stein hvor de kan holde seg fast. Tilsvarende miljø er kjent fra trange sund på kysten, men langt til havs er slike forhold uvanlig. Dette miljøet og dyresamfunnet utgjør en særegen biotop som tidligere ikke har vært beskrevet. Utenom Svalbardbanken og områder i Pechorahavet lenger øst, har vi grunn til å tro at «Brunpølsebunn» utgjør et sjeldent habitat i Barentshavet.



Figur 9.5. Brunpølsebunn (*Cucumaria frondosa*) på Spitsbergenbanken (27-46 m dyp).



Figur 9.6. Kransformet, ukjent mosdyr med bevegelige greiner i Sentralbankenrenna observert på MAREANO-tokt i 2017. Denne opptrådte i store tettheter lokalt.

I Sentralbankenrenna, mellom Sentralbanken og Storbanken, ble det i 2017 observert områder med store tettheter av et kransformet mosdyr med bevegelige greiner (Fig. 9.6). Dette mosdyret er enda ikke identifisert til art. De ulike nye observasjonene som MAREANO har gjort i felt viser at det er flere artssamfunn som ikke har vært godt beskrevet. En

9.1 Kunnskaps- og overvåkningsbehov

Det trengs mer kunnskap om hvordan ulike arter livnærer seg på isalger, spesielt i grunnere områder som på og rundt Spitsbergenbanken. Utbredelsen av snøkrabbe (*Chionoecetes opilio*) har ekspandert kraftig de siste ti år, og blitt betydelig i området rundt Sentralbanken, men den begynner nå også å gjøre seg gjeldende i polarfrontområdet i det vestlige Barentshavet. Kartlegging og overvåkning av denne bestanden vil være viktig for økt kunnskap om hvordan bunnfaunaen påvirkes. Dette vil kreve et supplement til dagens tråltokt, ettersom forskningstrålen som brukes i dag fanger snøkrabben lite effektivt. I tillegg bør dagens tråltokt forbedres slik at også mindre arter (makrofauna) som lever på og i sedimentene fanges, i motsetning til kun å fange de store epibentiske artene (megafauna) som i dag. I tillegg vil en bedre beskrivelse og oversikt over bunnlevende organismer vil være til stor nytte for fremtidig overvåking av endringer i naturtyteutbredelser som kan forårsakes av klimaendringer.

10 Sjøfugl og sjøpattedyr

Sjøfugl og sjøpattedyr er øverst i næringskjeden. Det er mangel på gode data på sjøfuglers arealbruk og vandringsmønster i polarfrontområdet, spesielt utenom hekkesesongen, mens det er langt mer informasjon fra andre frontområder. Det er kjent at sjøfugl synes å samle seg for søke etter mat i tilsvarende frontsoner i andre regioner (Kinder et al., 1983, Schneider et al., 1990, Coyle et al., 1992; Decker, 1995, Bost et al., 2009). Bost et al. (2009) peker på at i Antarktis er noen fronter viktigere som næringsområde for sjøfugl enn andre, og at fronter ofte er å betrakte som grenser for utbredelse. I to oversiktsartikler (Gabrielsen, 2009; Fauchald et al., 2011) nevnes ikke polarfronten som et spesielt viktig område i Barentshavet. Derimot synes iskantsonen å være svært viktig i deler av året. Mye tyder på at fordelingen av sjøfugl i Barentshavet hovedsakelig er bestemt av mattilgang og dens fordeling. Derfor varierer beiteområdene til sjøfugl gjennom året. Om vinter og vår er sjøfugl funnet nær iskantsonen og polarfronten, mens de sent på våren og om sommeren er konsentrert nært hekkeområdene (Wassmann et al., 2006).

Mehlum et al. (1998) studerte polarfronten som beiteområde for hekkende lomvi *Uria aalge*() og polarlomvi (*Uria lomvia*) på Bjørnøya. De benyttet temperaturgradienten i overflaten som indikator på frontens posisjon, og fant her de største konsentrasjonene av lomvi og polarlomvi på den dype siden av fronten. Det er imidlertid en klar forskjell på overflatefrontens posisjon og polarfrontens posisjon som finnes lengre ute mot større dyp. Mehlum et al. (1998) påpeker også at det er en front på dypere vann, og er usikker på som overflatefronten tilhører fronten som er på større dyp. Det som Mehlum et al. (1998) omtaler som overflatefonten er imidlertid fronten som av Loeng (1991) er definert som en sommerfront (fordi den bare finnes i sommerhalvåret) og som Fer & Drinkwater (2014) omtaler som tidevannsfronten (etter årsaken til dannelsen av den). Mehlum et al. (1998) peker på at de fant de største konsentrasjonene av krill der hvor de fant overflatefronten og at det ikke er uvanlig å finne de største konsentrasjonene i frontområder, både i Arktis og Antarktis (Wietek et al., 1981; Hampton, 1985). Kuletz et al. (2015) undersøkte den romlige fordelingen av sjøfugl og sjøpattedyr i Chukchi Sea og Beaufort Sea og fant flere områder med økte konsentrasjoner av begge. De påpeker at de områdene hvor det er konsentrasjoner av både sjøfugl og sjøpattedyr er sterke fronter med oppstrømning og sterke strømmer og at disse områdene bør prioriteres med tanke på utvikling av forvaltningsplaner.

Når det gjelder sel og hval synes det ikke å være noen nær sammenheng mellom utbredelse av disse artene og polarfronten. Imidlertid finnes de også i området hvor polarfronten er i perioder av sin oppholdstid i Barentshavet. Skern-Mauritzen et al. (2011) studerte sammenheng mellom vågehval (*Balaenoptera acutorostrata*), finnhval (*Balaenoptera physalus*) og knølhval (*Megaptera novaeangliae*) og deres mattilbud i perioden 2003-2007. Figurene viser at alle disse artene finnes i store deler av Barentshavet, men bare vågehvalen synes å ha sin hovedkonsentrasjon nær fronten eller nord for denne. De andre to hvalartene har ikke like tydelige fordelingsmønstre slik figurene deres kan tolkes. Mye tyder på at tettheten av disse bardehvalene er mer knyttet opp til mattilbudet som i første rekke er lodde og krill (Ressler et al., 2015). Også kvitnos (*Lagenorhynchus albirostris*) er periodevis observert i frontområdet (i hovedsak på atlantisk side), men mengden kan synes mer å være knyttet til tettheten av lodde (Fall & Skern-Mauritzen, 2011)

Når det gjelder sel så er det ingen klare sammenhenger mellom utbredelse og polarfronten. Det er imidlertid klart at sel som er i nærheten av iskantsonen om vinteren i det vestlige Barentshavet også vil være i polarfrontområdet, ettersom disse områdene til dels overlapper om vinteren. Dette gjelder i første rekke ringsel (*Pusa hispida*) som foretrekker iskonsentrasjoner på 40-80 % (Freitas et al., 2008; Hamilton et al., 2015), og som også er et viktig byttedyr for

isbjørn (Lone et al., 2017). Det er dokumentert at grønlandssel (*Pagophilus groenlandicus*) fra Kvitsjøen har en årlig beitevandring i Barentshavet, og denne vil være i området nær polarfronten i juni og juli (Nordøy et al., 2008; Fig. 10.1). Også grønlandssel fra Vesterisen kan for en kortere periode om sommeren vandre inn i de samme områdene (Folkow et al., 2004). For øvrig finnes lite informasjon om sel i området rundt polarfronten i Barentshavet.



Figur 10.1. Foreslått årlig beitevandningsrute for grønlandssel fra Kvitsjøen. Selen er i polarfront-området i juni-juli. (Nordøy et al., 2008).

10.1 Kunnskaps- og overvåkningsbehov

Mye av datagrunnlaget vi har på sjøfugl bygger på direkte observasjoner i hekkesesongen. Datagrunnlaget for de andre sesongene er imidlertid tynt og representerer et kunnskapsbehov. Det er ventet at nye data fra SEAPOP og SEATRACK vil bidra med betydelig ny kunnskap om sjøfuglers arealbruk gjennom resten av året, samt bedre datagrunnlag også i hekkesesongen. Med bedre data på sjøfuglers arealbruk og vandringsmønster kan man også i større grad koble dette opp mot biologiske parametere og dermed øke forståelsen av både økosystemets funksjon og også de biofysiske koblingene i polarfrontområdet.

Beitevandringruten for sjøpattedyr som grønlandssel, vågehval og kvitnos, inkluderer polarfrontområdet om sommeren. Det er imidlertid behov for økt kunnskap om i hvilket omfang (konsentrasjoner, periode, beiteaktivitet) disse sjøpattedyrene benytter polarfrontområdet og om de skiller mellom tidevanns-, polar- og smeltevannsfronten.

11 Sårbarhet

Denne rapporten er del to av arbeidet med å utrede det faglige grunnlaget knyttet til iskantsonen og polarfronten i forbindelse med revidering av det faglige grunnlaget til forvaltningsplanen for Barentshavet og Lofoten. Første del består av «Miljøverdier og sårbarhet i iskantsonen» (von Quillfeldt, et al., 2017). Iskantsonen og polarfrontområdet overlapper tidvis geografisk, hovedsakelig i vinterhalvåret, hvis i det hele tatt. Derfor vil det være betydelig overlapp mellom polarfrontområdet og området som dekkes av iskantsonen når dens sesongvariasjon inkluderes. Samtidig har vår kunnskap om det marine økosystemet i Barentshavet begrenset oppløsning i tid og rom. For eksempel vet vi at noen fiskebestander oppholder seg helt eller delvis i området som utgjør iskantsonen og polarfrontområdet og at dette kan gjelde i hele eller i deler av året. Derfor vises det her til iskantsonerapporten for en utfyllende sårbarhetsvurdering av de ulike komponentene og trofiske nivåene i økosystemet i polarfrontområdet, ettersom sårbarhetsvurderingen for iskantsonen vil overlappe og dermed også gjelde for polarfrontområdet. Vi vil imidlertid gi et sammendrag av sårbarhetsvurderingen gitt i iskantsonerapporten her, i tillegg til utfyllende og/eller spesifikk kunnskap for polarfrontområdet spesielt.

I forvaltningssammenheng er sårbarhet definert som sannsynligheten for at en effekt oppstår som følge av en påvirkning (Kværner et al., 2006). Når man skal identifisere sårbare områder, er det viktig å identifisere hva området er sårbart for, ettersom fysiske, kjemiske og biologiske egenskaper varierer fra område til område, i tillegg til at et område kan ha ulik sårbarhet til ulike tider på året og til ulik påvirkning. Videre, kan sårbarhet vurderes på arts-, bestands- og økosystemnivå, og tolkning av årsakssammenhenger blir mer krevende i takt med økt kompleksitet. Sårbarhetsvurderinger krever kunnskap om enkeltarter, deres levesteder, vandringsmønster og følsomhet i forskjellige livsfaser. I tillegg kan sammenhengen mellom påvirkningsfaktorer og respons i et økosystem være resultat av både direkte og indirekte trofiske interaksjoner. Følgelig er det umulig å angi sårbarhet på generell basis uten også å angi hvilken ressurs eller art man vurderer sårbarhet for, hva påvirkningen(e) er, og hvilke parametere man har informasjon om som vil påvirke sårbarheten. Det er imidlertid en stor utfordring at mange av parametere som bør inngå i sårbarhetsvurderinger er dårlig kjent og ofte forbundet med til dels stor usikkerhet.

De viktigste endringene i de marine økosystemene, og som har betydning for næringssituasjonen for mange arter som opptrer enten i iskantsonen eller polarfronten, er trolig klimaendringer og -variasjoner, endringer i fiskeriene og fluktuasjoner i de pelagiske fiskebestandene (Fauchald et al., 2015). Disse faktorene virker imidlertid over et større geografisk område enn polarfronten slik den er definert her. Under gjengis kort noen av disse faktorene basert på sårbarhetsvurderingen i iskantsonerapporten (von Quillfeldt et al., 2017), men her med et fokus på polarfrontområdet.

11.1 Ytre påvirkning

11.1.1 Klimaendringer

Konsekvenser av klimaendringer og -variasjoner inkluderer endringer i temperatur, isdekke, saltholdighet og værmønster, som i sin tur kan påvirke havstrømmer og blandingsprosesser. Den største endringen som følge av klimaendringer i polarfrontområdet er imidlertid endringer i isutbredelse, spesielt i de østlige områdene. Barentshavet er det området i Arktis hvor isdekket har hatt den største tilbakegangen, og da spesielt om vinteren (f.eks. Yang et al., 2016). Effekter av det reduserte isdekket inkluderer tidligere smelting og senere tilfrysing og dermed lengre sesong med isfritt hav, noe som bl.a. påvirker bestander som har sjøisen som sitt habitat. Redusert isdekke vil gi mindre smeltevann som kan bidra til lagdeling nord for polarfronten om

sommeren. Klimaendringer vil kunne påvirke økosystemet på alle trofiske nivå. I tillegg er bunnlevende organismer, som koraller, følsomme for temperaturendringer.

11.1.2 Havforsuring

Verdenshavene blir surere (mindre basisk) som følge av økt mengde CO₂ i atmosfæren, ettersom CO₂ tas opp av havet og danner karbonsyre når det reagerer med vann. Ettersom kaldt vann kan holde på mer gass enn varmt vann, blir effekten av økt CO₂ og følgelig havforsuring større på høyere bredder. Kalsiumkarbonatmetning av aragonitt (Ω_{Ar}) betraktes som en indikator for havforsuring, siden det er et mål for oppløsningspotensialet for skall og skjelett av aragonitt (mest labile CaCO₃ typen). I Barentshavet er vannkolonnen generelt overmettet med hensyn til aragonitt ($\Omega_{Ar} > 1$). I bunnvann nord om PF vises laveste verdiene der Ω_{Ar} under 1,2, som som har blitt rapportert å være en kritisk Ω_{Ar} -verdi for noen aragonittdannende organismer (f.eks. vingesnegl (*Limacina helicina*)) og gir en negativ innvirkning på deres forkalkning av skallet (f.eks.; Bednarsek et al., 2012; 2014; Manno et al., 2017). Overflaten i det sørvestlige Barentshavet er også overmettet med hensyn til aragonitt i alle årstider (1,5-2,1), og den laveste Ω_{Ar} ble observert om vinteren 1,5 og høyest om sommeren 2,1 (Chierici et al., 2017), på grunn av primærproduksjon som binder CO₂. Redusert pH medfører økt løselighet av kalk, og dette kan påvirke marine arter som er avhengige av kalk for å bygge skjelett eller skall, deriblant noen arter plankton og muslinger. Artene evne til å tilpasse seg endring eller til å reparere skader i skallet vil påvirke effekten av havforsuring (Peck et al., 2016). Noen studier har vist økte metabolske kostnader for unge stadier av *C. glacialis* ved økt mengde CO₂ (Thor et al., 2016), men det ser likevel ut til at de store *Calanus*-artene, som *C. glacialis*, er relativt upåvirket av økte nivåer av CO₂ (Bailey et al., 2016; Hildebrandt et al., 2014). Effekter av havforsuring har imidlertid blitt påvist på tidlige livsstadier av enkelte fiskearter (Frommel et al., 2012; Stiasny et al., 2016). Havforsuring kan få integrerte effekter på økosystemet, og sjøfugl og marine pattedyr er eksempler på grupper som vil bli påvirket indirekte gjennom endret kvalitet og kvantitet av byttedyr.

11.1.3 Miljøgifter

Langtransport via luft og vann er hovedkilden til miljøgifter i Arktis. Generelt er det lave nivåer av miljøgifter og radioaktive stoffer i det arktiske miljøet, med unntak av artene på de øverste nivåene, som isbjørn (*Ursus maritimus*), tannhvaler, sjøfugl og sel (von Quillfeldt, 2010).

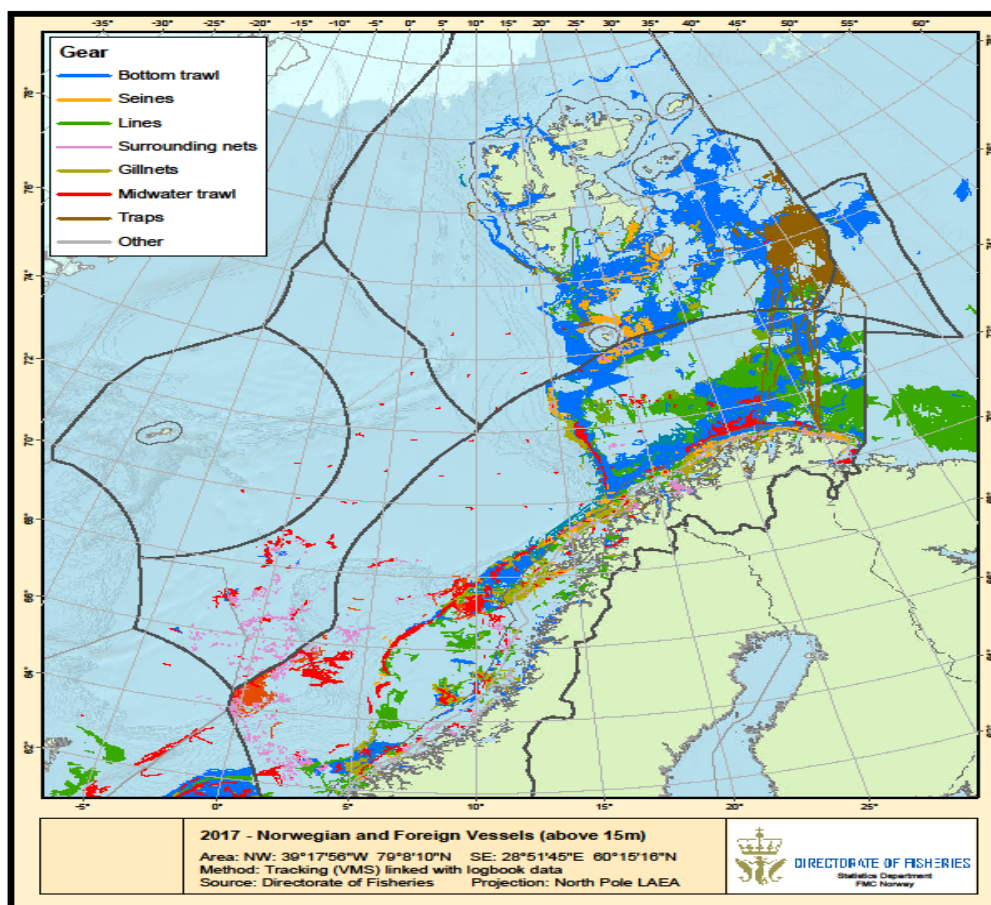
11.1.4 Plast

Plastforurensning har vokst til å bli en av de største miljøutfordringene de siste 20-30 år. Plast transporteres med havstrømmene, og Arktis, og Barentshavet i særdeleshet, ser ut til å være et akkumuleringsområde for plast (Cozar et al., 2017). Figur 5.2 (Kap. 5.1.1) indikerer mye virveldannelse i polarfrontområdet, som betyr at plast som kommer inn i dette området kan få en forlenget oppholdstid. Ved aldring vil plast smuldre opp i mindre partikler, og det er påvist store antall partikler som i størrelse overlapper fødepartikler for filtrerende zooplankton, og vil kunne fraktes videre i næringskjeden ved predasjon (Wieczorek et al., 2018). Større plastgjenstander utgjør et problem for fisk og sjøfugl som tolker dem som mat, med konsekvenser som sult, forstoppelse og nedsatt vitalitet. Plast kan også ta opp miljøgifter og plastforurensning kan dermed overføre giftige stoffer til organismene (Cole et al., 2011). I tillegg kan plast som driver med havstrømmene frakte fremmede arter som sitter fast eller vokser på plastobjektene (Gregory, 2009). Det er store kunnskapshull omkring marint

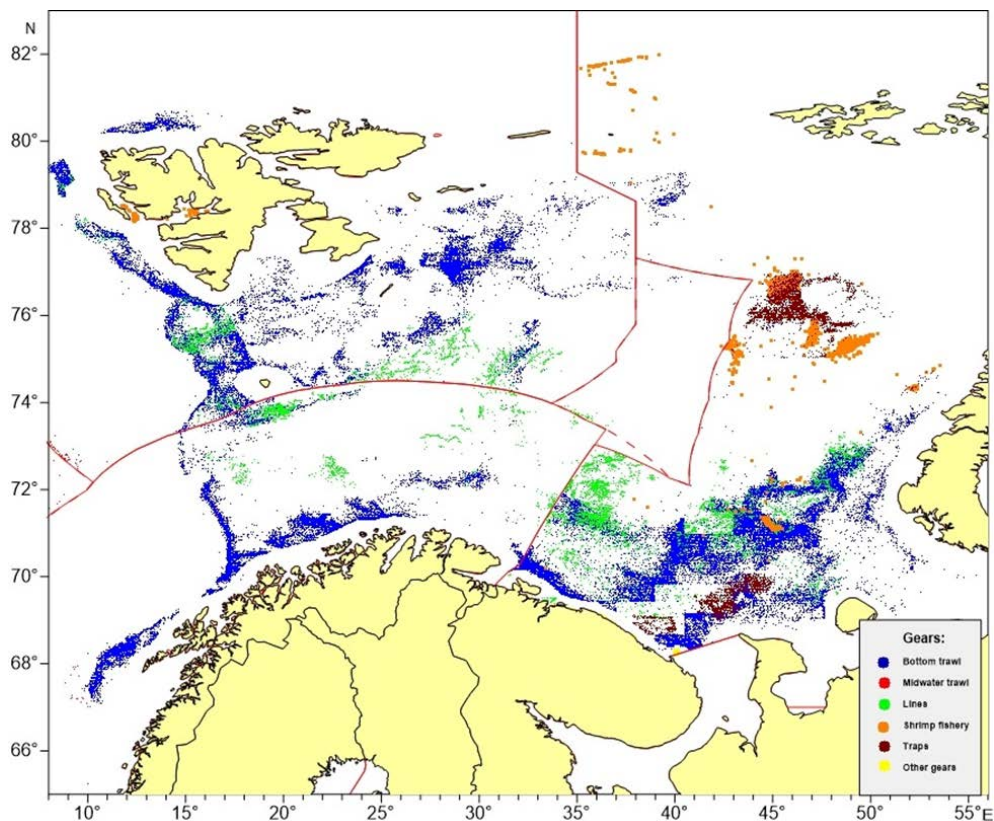
plastsøppel, bl.a. hvordan plast kan ta opp miljøgifter og dermed overføre giftige stoffer til organismer (Cole et al., 2011). Men det er også stor forskningsaktivitet omkring plastforsøpling i havet og hvordan dette påvirker marint miljø og marine økosystem. I Barentshavet har søppel fra trålfangster blitt kartlagt siden 2011 (Grøsvik et al. 2018), og Havforskningsinstituttet kommer til å utvide denne kartleggingen til også å omfatte de minste partiklene i hele vannsøylen og plast i organismer.

11.1.5 Fiskeri

Det foregår en del fiskerier i polarfrontområdet i deler av året, spesielt reketråling, men også bunntrålfiske etter torsk og fiske med line (Figur 11.1-11.2). Ved Sentralbanken er det også en del teinefiske. Samtidig flytter fiskeriene seg ettersom isdekket og utbredelsen til de kommersielle artene endres. Bunntråling kan skade bentiske samfunn, særlig komplekse samfunn med et høyt antall arter og samfunn med stillestående, oppreiste arter med lav mobilitet. Slike samfunn finner man på og rundt bankene i Barentshavet og dermed også i polarfrontområdet i det vestlige Barentshavet (von Quillfeldt et al., 2017). Bl.a. er det for tiden under utredning i OSPAR hvorvidt *Haploops*-samfunnet på Thor Iversen-banken skal vurderes som truet grunnet fiskeriaktivitet i området (se også Kap. 9; Fig. 9.3).



Figur 11.1. Lokalisering av norsk og utenlandsk fiskeriaktivitet fra kommersiell flåte (båter større enn 15 meter total lengde) og fiskefartøy brukt o forskningsøyemed i 2017, som rapportert (VMS) til norske myndigheter. VMS-data er koblet med loggbok-data. Kilde: Fiskeridirektoratet.



Figur 11.2. Lokalisering av russisk og utenlandsk fiskeriaktivitet fra kommersiell flåte og fiskefartøy brukt i forskningsøyemed i 2017, som rapportert (VMS) til russiske myndigheter. VMS-data er koblet med loggbok-data. Kilde: PINRO fiskeristatistikdatabase.

11.1.6 Oljeutslipp fra skipstrafikk og petroleumsvirksomhet

Oljeutslipp fra uhell i forbindelse med skipstrafikk eller petroleumsaktivitet påvirker i første rekke sjøfugl og sjøpattedyr, ettersom mange arter tidvis oppholder seg i vannoverflaten. Men også fisk, og da særlig i tidlige, pelagiske livsstadier (egg og yngel), vil kunne påvirkes av oljeutslipp. Påvirkning fra giftige kjemikalier i tidlige livsstadier hos fisk kan blant annet føre til redusert vekst, deformasjoner eller død (Vikebø et al., 2013; 2015, og referanser deri). Det er imidlertid store forskjeller mellom ulike arter når det gjelder hvilke konsentrasjoner oljeforurensning som utgjør skadelig nivå. Spesielt er egg og larver av hyse (*Melanogrammus aeglefinus*) utsatt, ettersom hyseeggene er klebrige og derfor akkumulerer oljeforurensning i mye større grad enn f.eks. torskeegg. Dette betyr at hyseegg påvirkes negativt ved vesentlig lavere konsentrasjoner av olje enn torskeegg (Sørhus et al., 2015; Sørensen et al., 2017). Imidlertid viser nyere studier i prosjektet EGGTOX at alle 6 artene som ble undersøkt (torsk, hyse, sei (*Pollachius virens*), kveite (*Hippoglossus hippoglossus*), sild (*Clupea harengus*), polartorsk (*Boreogadus saida*)) utviklet alvorlige deformasjoner under larvestadiet, når eggene ble eksponert i tre dager for oljekonsentrasjoner representative for et alvorlig oljeutslipp. Påviste, negative konsekvenser inkluderer utviklingsskader på hjerte, skjelett og kranium, samt væskeansamling i plommesekken. Foreløpige modellstudier indikerer at sterke fiskebestander, som skrei, vil kunne tåle store tap i en årsklasse, mens bestander som er svakere, mer lokale, eller som rekrutterer ujevnt mellom år, vil kunne påvirkes i større grad gjennom et tap av en

årsklasse som følge av oljeforurensning (Carroll et al., 2018). Retensjon (bakevjer, dvs. økt oppholdstid i et område) i forbindelse med adveksjon av vannmasser og påfølgende virveldannelse langs polarfronten (se Kap. 5.1.1; Fig. 5.2) kan bidra til å forlenge eksponeringstiden og dermed øke risikoen for negative konsekvenser ved et oljeutslipp, ettersom eksponeringstid er en faktor som påvirker sårbarhet.

11.2 Økosystemrespons

11.2.1 Endret produksjon

Primærproduksjonen er i stor grad styrt av fysiske prosesser – isdekke styrer lysforholdene i vannsøylen, lagdelingen definerer når planteplanktonet vil oppleve positiv netto produksjon, mens vertikal blanding styrer tilgangen på næringssalter. Endringer i isdekke og lagdeling av vannmassene som følge av klimaendringer vil endre både tidspunkt, intensitet og varighet på våroppblomstringen ettersom tilgang på lys og næringssalter i polarfrontområdet endres. Mindre is og dermed mindre smeltevann vil kunne bidra til en borealisering (dvs. endring fra kalde forhold dominert av arktisk vann til varmere forhold mer dominert av atlantehavsvann) av områdene også nord for polarfronten, hvor svakere lagdeling vil gi en mindre intens blomstring og samtidig åpne for økt vertikal fluks av næringssalter og dermed forlenget blomstringsperiode (Barber et al., 2015).

I tillegg til vertikal blanding, eller mangel på sådan, er adveksjon av vannmasser viktig for tilgangen på næringssalter. Vi har sett at mengden silikat har avtatt i de atlantiske vannmassene som renner inn i Barentshavet, noe som igjen vil påvirke ikke bare mengden planteplankton som produseres, men også hvilke arter som vil dominere og dermed også hvilken vei energien vil ta oppover i næringsnett, noe som vil kunne gi ringvirkninger oppover i de trofiske nivåene.

I områder som tidligere har vært islagt om våren vil en reduksjon i isdekke som følge av et varmere klima gi endrede lysforhold og dermed også endret tidspunkt for start på våroppblomstringen. Endrede isforhold påvirker også den bentisk-pelagiske koblingen, som kan få integrerte effekter i hele økosystemet, fordi en reduksjon i havis kan ha en dramatisk effekt på timing, omfang og romlig fordeling av is-assosiert og pelagisk primærproduksjon og dermed tilgangen til denne matkilden for bentiske og pelagiske konsumenter (Carroll & Carroll, 2003; Hansen et al., 2003; Grebmeier et al., 2006; Wassmann et al., 2006). Dette har også mulige ringvirkninger gjennom endret mattilbud for marine pattedyr og fiskearter som har spesialisert seg på beiting på bunndyr.

11.2.2 Endret fødekvalitet

Utbredelse av dyreplankton er sterkt påvirket av de fysiske forhold, bl.a. gjennom de ulike artenes forskjellige temperaturotoleranse og adveksjon ettersom dyreplankton i stor grad kan regnes som å drive passivt horisontalt (vertikalt vil derimot egenbevegelse ha en betydning). Endringer i strøm- og/eller temperaturforhold vil derfor kunne gi endringer i dyreplanktonsamfunn i polarfrontområdet. Endret artssammensetning på lavere trofiske nivå vil ha integrerte effekter i økosystemet. Borealisering som følge av oppvarming fører til at arter utvider sitt utbredelsesområde nordover, som f.eks. en dreining av dominerende hoppekreps fra arktiske (f.eks. *C. glacialis*) mot mer atlantiske arter (f.eks. *C. finmarchicus*), dvs. arter som har lavere energiinnhold (Hop et al., 2006; Weydmann et al., 2014; Wassmann et al., 2015). Endringer i sammensetning av byttedyr fra et arktisk næringsnett dominert av iskantsonefauna

som polartorsk og *Themisto libellula*, til et mer borealt næringsnett dominert av lodde, torsk og krill, har negative konsekvenser for flere artsgrupper, f.eks. sjøfugl, og da spesielt ismåke (*Pagophila eburnea*), polarlomvi, teist (*Cepphus grylle*) og alkekonge (*Alle alle*) (f.eks. Fluhr et al., 2017). Megabenthossamfunnene i ispåvirkede områder vil også kunne få endret artssammensetning som følge av endret mattilgang når isdekket endres, noe som vil kunne favorisere opportunistiske arter som kan tilpasse seg endring fra fersk føde fra havis til degradert pelagisk detritus (Sun et al., 2009).

Potensielt kan endringer i planktonsamfunnet også påvirke såkalt match/mismatch mellom tilgjengelige kopepoditt-stadier av spesifikke dyreplanktonarter og larver og yngel av spesifikke arter fisk. Dette kan få konsekvenser for fiskearter som har polarfrontområdet som sitt beite- og oppvekstområde, slik som lodde og blåkveite (*Reinhardtius hippoglossoides*). I tillegg til endringer i tidsmessig tilgjengelighet og størrelsesfordeling vil endringer i arter tilgjengelige dyreplankton også representere endret næringsinnhold og -sammensetning, som også vil kunne påvirke rekrutteringssuksess til berørte arter på høyere trofiske nivåer.

11.2.3 Forflytning av arter og endrede konkurranseforhold

Borealiserings, eller «atlantifisering» av områdene nord for polarfronten bidrar til en nordlig utvidelse av leveområder for en rekke boreale arter på alle nivå i næringskjeden, og en nedgang i arktiske (Fossheim et al., 2015). Dette skyldes både direkte faktorer som endringer i geografisk utbredelse som følge av endret temperatur, og indirekte bl.a. gjennom endrede næringskjeder. Bl.a. ser man at arter som torsk, hyse og lodde trekker nordover og inn i områder nord for polarfronten (Haug et al., 2017). Ettersom vannmassene nord for polarfronten varmes opp, ser man at fronten ikke lenger utgjør noen barriere for en del bestander, som f.eks. torsk, selv om fronten består både i form av geografisk plassering og temperaturgradient. Men dette vil selvsagt variere fra art til art avhengig av den enkelte arts temperaturpreferanser. Her er det imidlertid også viktig å påpeke at det ikke bare er temperatur som er bestemmende for en arts endring i utbredelse. En studie av Landa et al. (2014) viser f.eks. hvordan utbredelsen av hyse endres med endret temperatur i Barentshavet, men hvor en økning i bestanden, som skyldes bedre rekruttering, synes å være styrende for den totale utbredelsen. Dette har videre resultert i at omgivelsestemperaturen på individnivå i gjennomsnitt har gått ned i samme periode som temperaturen i Barentshavet generelt har gått opp, ettersom bestanden har økt sin utbredelse inn i kaldere vannmasser.

12 Vurdering av polarfrontens verdi for de marine økosystem

12.1 Næringsalter og Planteplankton

Tilgjengeligheten av næringsalter og påfølgende primærproduksjon legger selve grunnlaget for hvor stor biologisk produksjon og aktivitet et område kan understøtte. Næringsalterene og primærproduksjonen har derfor svært høy biologisk verdi. I våroppblomstringssystemer, som det man har i Barentshavet, er primærproduksjonen hovedsakelig knyttet til oppblomstringen vår og sommer. Tidevannsfronten rundt Spitsbergenbanken, samt smeltevannsfronten knyttet til issmelting vår og sommer, er på grunn av sine fysiske særtrekk områder hvor oppblomstringen er mer intens enn i omkringliggende områder, inkludert polarfronten.

12.2 Dyreplankton

Dyreplankton representerer bindeleddet mellom primærproduksjonen (planteplankton) i havet og de høyere trofiske nivåene i næringskjeden, og spiller derfor en avgjørende rolle når det gjelder å bringe energien fra primærproduksjonen oppover i økosystemet, inkludert til artene som utgjør de høstbare marine ressursene. Dyreplankton har derfor svært høy biologisk verdi. For arter som advekteres inn i området, som *C. finmarchicus*, er polarfrontområdet en del av utbredelses- og beiteområdet i sommerhalvåret. For arter som har sitt kjerneområde lokalt i Barentshavet, som *C. glacialis*, er utgjør imidlertid polarfrontområdet en del av beiteområdet om sommeren og i tillegg en del av oppholdsområdet også resten av året.

12.3 Fisk

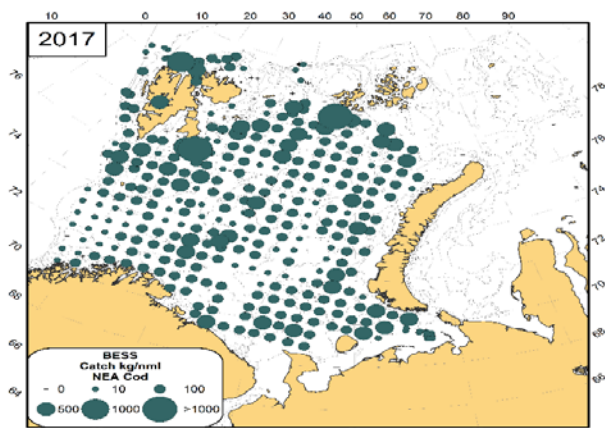
Det finnes ikke noe godt estimat på hvor mange fiskearter som lever i polarfrontområdet hele eller deler av sin levetid. For noen av de kommersielt viktige fiskeartene i Barentshavet er polarfronten et beiteområde i deler av året, men for noen arter er det også et oppvekstområde. Mange arter har en stor sesongmessig variasjon i den geografiske fordelingen, mens noen ikke-kommersielle arter har hele livssyklusen sin i dette området. De kommersielt viktigste artene i Barentshavet er torsk, hyse, snabeluer (*Sebastes mentella*), blåkveite og lodde.

Ettersom polarfrontområdet og iskantsonen delvis overlapper i rom, spesielt vinterstid, og vår kunnskap om fiskeartenes fordeling har begrenset oppløsning i rom og tid, har verdi- og sårbarhetsvurderingen her betydelig overlapp med verdi- og sårbarhetsvurderingen som er gitt i iskantsonerapporten (von Quillfeldt et al., 2017).

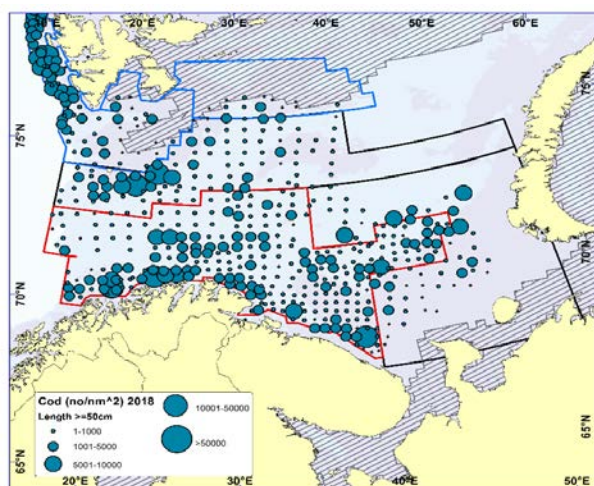
12.3.1 Torsk

Beiteområdet for torsk omfatter polarfrontområdet og omkringliggende banker både sør for og nord for dette på sommerstid (Fig. 12.1), og det omfatter til dels også polarfrontområdet på vinterstid (Fig 12.2). Torskens beiteområder strekker seg også opp langs polarfronten langs vestkysten av Svalbard og ut på høsten også nord for Svalbard.

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår	Beiteområde		
Sommer		Beiteområde	
Høst		Beiteområde	
Vinter	Beiteområde		



Figur 12.1. Torsk. Fordeling basert på bunntålfangst høsten 2017 (kg per nm). Nullfangst er indikert med prikker.



Figur 12.2. Torsk ≥ 50 cm. Fordeling basert på bunntålfangst vinteren 2018 (antall per nm²). Nullfangst er indikert med svarte prikker. De skraverte områdene var dekket av is og utilgjengelige under kartleggingen.

12.3.2 Lodde

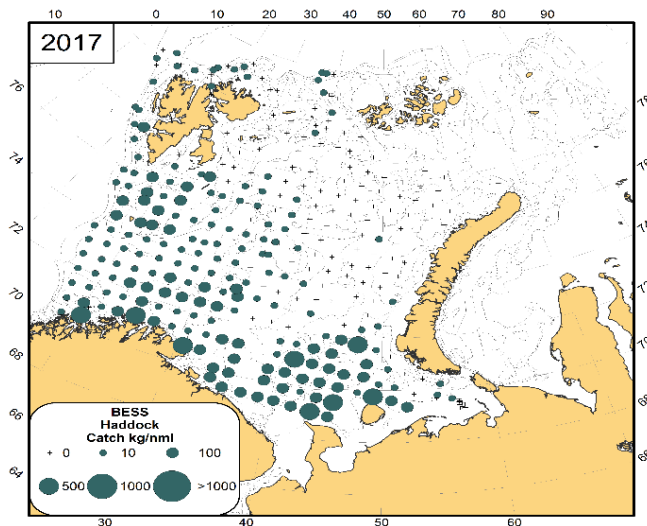
Beiteområdet for lodde flytter seg fra sør for polarfronten tidlig på sommeren, og strekker seg senere på sommeren og høsten gjennom polarfrontområdet og videre nord for dette. Senhøstes vandrer lodda sørover og overvintret i stor grad i polarfrontområdet. Lodde er torskens viktigste byttedyr, og lav loddebestand har i noen perioder påvirket torskens negativt.

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår	Beiteområde		
Sommer	Beiteområde		
Høst	Beiteområde		
Vinter			Beite- og overvintningsområde

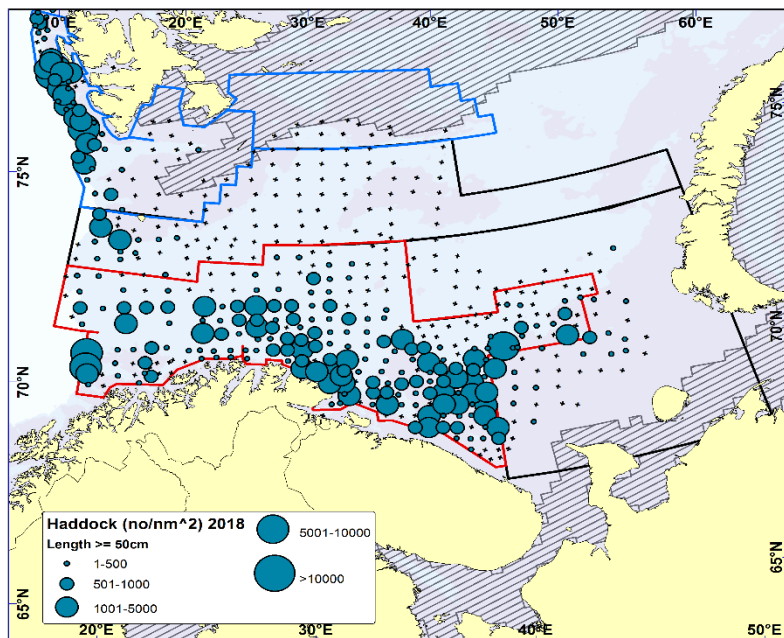
12.3.3 Hyse

Beiteområdet for hyse strekker seg om sommeren og høsten inn i polarfrontområdet (Fig. 12.3), også i polarfrontområdet langs vestsiden av Spitsbergen. Også om vinteren finnes hysa til dels langs vestkysten av Spitsbergen (Fig. 12.4).

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår			
Sommer	Beiteområde		
Høst	Beiteområde		
Vinter			



Figur 12.3. Hyse. Fordeling basert på bunntålfangst høsten 2017 (kg per nm). Nullfangst er indikert med prikker.



Figur 12.4. Hyse ≥ 50 cm. Fordeling basert på bunntålfangst vinteren 2018 (antall per nm²). Nullfangst er indikert med svarte prikker. De skraverte områdene var dekket av is og utilgjengelige under kartleggingen.

12.3.4 Snabeluer

Beiteområdet for snabeluer strekker seg mot polarfronten både om sommeren og vinteren.

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår	Beiteområde		
Sommer	Beiteområde		
Høst	Beiteområde		
Vinter	Beiteområde		

12.3.5 Blåkveite

Polarfrontområdet og områdene nord for dette er viktige oppvekstområder for blåkveite og den finnes trolig i dette området hele året (se bl.a. Figur 12.5). Den gyter også langs eggakanten som delvis strekker seg inn i polarfronten.

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår			Gyte-, beite- og oppvekstområde
Sommer		Beite- og oppvekstområde	
Høst		Beite- og oppvekstområde	
Vinter			Gyte-, beite-, overvintrings- og oppvekstområde



Figur 12.5. Blåkveite. Utbredelseskart.

12.3.6 Gapeflyndre

Utbredelsesområdet for gapeflyndre (*Hippoglossoides platessoides*) overlapper med polarfronten om sommeren og høsten, og deler av gapeflyndrebestanden oppholder seg også i dette området om vinteren.

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår		Beite- og overvintringsområde	
Sommer	Beiteområde		
Høst	Beiteområde		
Vinter		Beite- og overvintringsområde	

12.3.7 Andre arter

Det er mange arter som finnes i polarfrontområdet hele eller deler av året. Den vandrende bestanden polartorsk holder seg stort sett nord for polarfronten i beiteperioden, men gytingen i det østlige Barentshavet foregår i eller sør for polarfronten. Mange, hovedsakelig små arter som lever nær bunnen, som ålebrosmer (*Lycodes vahlii*), ulker (*Myoxocephalus scorpius*) og ringbuker (*Liparis liparis*), er relativt stasjonære og finnes i og på begge sider av polarfronten hele året.

12.4 Sjøfugl

Vi har begrenset kunnskap om sjøfuglens bruk av polarfronten og dens betydning for sjøfuglbestandene gjennom året. Imidlertid er det forventet at de siste års utvikling av ulike sporingsteknikker gjennom programmet SEAPOP og samarbeidsprosjektet SEATRACK vil gi betydelig økt kunnskap om ulike sjøfuglarters vandringsmønstre generelt og opphold ved og bruk av polarfronten spesielt. Denne nye kunnskapen om hvilke arter som oppholder seg i og ved polarfronten til hvilken årstid er ventet å kunne bidra til en bedre og mer presis verdivurdering av polarfronten mhp. sjøfugl i fremtiden.

Arktis er det området på kloden som hittil har opplevd de største og raskeste klimaendringene og det er ventet å fortsette også i fremtiden (f.eks. IPCC, 2013). Observasjonsdata indikerer imidlertid at evne til endring i forhold til endrede klimatiske forhold kan variere i de ulike trofiske nivåene og at sjøfugler, som er relativt langlivede, i mindre grad klarer å tilpasse sin livssyklus til endrede fysiske forhold (Keogan et al., 2018). Økt kunnskap om sjøfuglers evne til å tilpasse seg et endret fysisk miljø, slik som endringer i hekketid og beitevandring, trengs for bedre å kunne vurdere de ulike sjøfuglartenes sårbarhet overfor klimaendringer.

I verdivurderingen for sjøfugl i polarfronten følger vi i stor grad verdivurderingen som er gitt i iskantsoner rapporten (von Quillfeldt et al., 2017), hvor det tas hensyn til 1. livshistorisk viktige områder/perioder og 2. rødlistestatus. I verdissetingen er det benyttet tre nivåer: lav, middels, høy.

12.4.1 Havhest

Havhesten (*Fulmarus glacialis*) har en stor bestand på Svalbard og den furasjerer (beiter) ofte i iskantsonen gjennom hele året. Den befinner seg således også i polarfrontområdet også senvinters og tidlig vår, når polarfronten sammenfaller med iskantsonen. I tillegg følger den oppblomstringen gjennom sommersesongen. Betydningen av dette området for furasjering er imidlertid ukjent, men det er trolig viktig for bestanden på Svalbard.

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår	Furasjering		
Sommer	Furasjering		
Høst			
Vinter	Furasjering		
Rødliste			

12.4.2 Ismåke

Ismåken er en høyarktisk art som er direkte avhengig av iskantsonen gjennom hele livsløpet og den oppholder seg i isfylte farvann hele året. Polarfrontområdet utgjør således et viktig område for ismåken de deler av året da den sammenfaller med iskantsonen, dvs. senvinters og tidlig vår før hekkestart (Strøm et al., 2015; Fig. 12.6).

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår			Furasjering
Sommer			
Høst			
Vinter			Furasjering
Rødliste		Sårbar	



Figur 12.6. Skjematisk fremstilling av forflytningene hos ismåke gjennom året for de fire delpopulasjonene i Canada, på Grønland, Svalbard og på de russiske arktiske øyene øst til Severnaja Semlja. Rød farge: hekkeområder; gul: viktige områder før hekkestart; grønn: viktige områder etter hekking; blå: overvintringsområder. Kilde: Strøm et al. 2015.

12.4.3 Krykkje

Kolonier av krykkje (*Rissa tridactyla*) forekommer rundt Barentshavet og den furasjerer ofte i iskantsonen og følger denne gjennom sommeren, sannsynligvis som en følge av at våroppblomstringen følger iskanten nordover utover sommeren. Følgelig furasjerer krykkje også i polarfrontområdet i deler av året da denne overlapper med iskantsonen og også når det er stor produksjon her. Det er nylig påvist at dietten til krykkje langs vestsiden av Spitsbergen har endret seg betydelig de siste 20 år, fra en dominans av arktiske arter, som polartorsk, til mer boreale arter, som lodde (Vihtakari et al., 2018).

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår	Furasjering		
Sommer			
Høst			
Vinter	Furasjering		
Rødliste	Nær truet		

12.4.4 Polarlomvi

Polarlomvi hekker bl.a. på Svalbard, og den bruker polarfrontområdet aktivt til furasjering vår og sommer (Mehlum et al., 1998). Den store polarlomvibestanden på Svalbard er imidlertid i tilbakegang, og en endring fra et arktisk næringsnett dominert av polartorsk og *Themisto libellula* mot et mer borealt næringsnett dominert av lodde, torsk og krill, er trukket frem som en mulig forklaring på tilbakegangen (Descamps et al., 2013; Fluhr et al., 2017).

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår		Furasjering	
Sommer		Furasjering	
Høst			
Vinter			
Rødliste	Nær truet		

12.4.5 Lomvi

Bjørnøya er den viktigste hekkeklassen for lomvi i Barentshavet, og herfra bruker den polarfrontområdet aktivt til furasjering vår og sommer (Mehlum et al., 1998).

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår		Furasjering	
Sommer		Furasjering	
Høst			
Vinter			
Rødliste			Kritisk truet

12.4.6 Alkekonge

Alkekongen hekker bl.a. på Svalbard. Den er nært knyttet til iskantsonen og henter næring i isfylte farvann gjennom hele året. Følgelig er den også knyttet til polarfrontområdet når dette sammenfaller med iskantsonen om vinteren og våren. Dietten består hovedsakelig av små krepsdyr, spesielt hoppekreps (kopepoder) som *Calanus* spp.

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår	Furasjering		
Sommer			
Høst			
Vinter	Furasjering		
Rødliste	Nær truet		

12.5 Sjøpattedyr

Polarfrontområdet og iskantsonen overlapper delvis i rom vinterstid. For en verdivurdering av områdets betydning for arter som først og fremst er knyttet til iskantsonen og ikke til polarfronten som sådan, viser vi her derfor til verdi- og sårbarhetsvurderingen gitt i iskantsonerapporten (von Quillfeldt et al., 2017).

I de perioder hvor polarfrontområdet ikke overlapper med iskantsonen, utgjør polarfrontområdet først og fremst et beiteområde for sjøpattedyr.

12.5.1 Grønlandssel

I juni og juli inngår polarfrontområdet som en del av grønlandsselen fra Kvitsjøen sitt årlige beitevandringsområde (Nordøy et al., 2008). Om sommeren finnes det også grønlandssel fra Vesterisen i polarfrontområdet (Folkow et al., 2004).

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår		Furasjering	
Sommer		Furasjering	
Høst			
Vinter			
Rødliste			

12.5.2 Vågehval

Polarfrontområdet inngår om sommeren i vågehvalens beitevandringsområde, hvor den ser ut til i hovedsak å oppsøke områder med forhøyede konsentrasjoner av lodde og krill.

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår			
Sommer		Furasjering	
Høst			
Vinter			
Rødliste			

12.5.2 Finnhval og knølhval

Finnhval og knølhval er observert i polarfrontområdet om sommeren, og da særlig i områdene rundt Bjørnøya og nordover i Storfjordenrenna og langs vestsiden av Spitsbergen (Øien, 2009).

	Lav verdi	Middels verdi	Høy verdi
Vår			
Sommer		Furasjering	
Høst			
Vinter			
Rødliste			

12.6 Bunnsamfunn og naturtyper

For bunnsamfunn og naturtyper mangler vi en del kunnskap for å kunne gjøre en verdivurdering av polarfrontområdets rolle. Det pågår imidlertid kartlegging gjennom MAREANO-programmet, i tillegg til prøvetaking under overvåkingstøkt. Vi henviser derfor til Kap. 9 for en gjennomgang av kunnskapsstatus, samt en oppsummering av kunnskapsbehov for å kunne gjøre en verdivurdering.

13 Kunnskaps- og overvåkningsbehov

Behov for ny kunnskap og utvidet overvåking er kort oppsummert under hvert delkapittel som omhandler fysikk og de ulike trofiske nivåene. I tillegg til disse behovene for økt kunnskap er det viktig å fortsette innsatsen innen integrert økosystemvurdering og -forståelse både for å kunne forbedre verdi- og sårbarhetsvurderinger i det marine økosystemet i dag og også under fremtidige endringer.

I forbindelse med det nasjonale prosjektet «Arven etter Nansen» vil det bli gjort en stor innsats både på datainnsamling, kunnskapsgenerering og økt forståelse av de biokjemiske og biofysiske forhold i det nordlige Barentshavet, i tillegg til økt forståelse av økosystemets sammensetning og funksjon. I tillegg vil datainnsamlingen bidra til å bygge opp et kunnskapsgrunnlag basert på de neste 6 årene som igjen kan brukes til å studere endringsraten og variabiliteten i både de fysiske så vel som de biologiske og kjemiske forhold i den nordlige delen av Barentshavet. Videre, så vil prosjektet bidra til å utdanne neste generasjons havforskere, noe som vil være med å sikre videre innsats for å øke vår kunnskap og forståelse av de marine prosesser og sammenhenger i Barentshavet. Spesielt vil Arven etter Nansen og bruken av det nye isgående forskningsfartøyet FF «Kronprins Haakon» gi tilgang til data fra de nordlige, arktiske delene av Barentshavet også i vinterhalvåret – et område som tidligere har hatt begrenset tilgjengelighet i denne delen av året. Dette vil bidra til økt kunnskap om og forståelse av variabilitet både mellom år og gjennom året i det nordlige Barentshavet. Spesifikt vil dette kunne bidra til å dekke flere av de identifiserte kunnskapsbehovene som er listet i de foregående kapitler, inkludert årssyklus i hydrografiske og kjemiske (inkl. næringsalter) forhold i polarfrontområdet gjennom året, baseline-informasjon om planktonsamfunn og sammenligningsgrunnlag mot variasjon fra tidligere tider, samt økt kunnskap om hvilke fiskearter som oppholder seg i polarfronten til ulike tider på året. I tillegg vil fysiske prosesser som styrer polarfrontens nordlige utbredelse i området mellom Spitsbergenbanken og Storbanken være et fokusområde.

Effekter av havforsuring og plastforurensning er to problemstillinger som vil kreve økende oppmerksomhet fremover. Etersom begge problemstillingene gjelder generelt for stort sett alle havområder og ikke spesielt for polarfrontområdet, vil vi her kun nevne de kunnskaps- og overvåkningsbehov som mer direkte angår polarfrontområdet i Barentshavet.

Etersom Barentshavet er et av de første kommersielt viktige marine økosystemene som vil oppleve effekter av havforsuring, slik som undermetning av aragonitt, vil overvåking av tilstanden i Barentshavet være viktig, samtidig som økt kunnskap om og forståelse av hvordan havforsuring påvirker det marine økosystemet være avgjørende. Herunder hvordan havforsuring påvirker både direkte på både individnivå og populasjonsnivå, og indirekte gjennom trofiske interaksjoner.

Foreløpige modellsimuleringer indikerer at Barentshavet vil være et aggregeringsområde for marint søppel og plast. Overvåking av plast, inkludert mengde og romlig fordeling, i tid vil derfor være viktig for å få kunnskap om hvor raskt aggregeringen skjer og hvilke nivåer det er av ulike plastkomponenter, samt størrelsesfordeling. Her vil det også være et behov for å overvåke hvorvidt polarfronten, som grenseområdet mellom atlantehavsvann og arktisk vann, også vil være et aggregeringsområde eller ikke. Videre, vil det være avgjørende med en økt innsats på å få økt kunnskap om mulig opptak og eventuelt virkninger av opptak av plast i næringskjeden. Det er allerede prosjekter i gang som skal drive både overvåking og kunnskapsgenerering angående eventuelle virkninger av opptak av plast, og det vil være avgjørende å ha et økt fokus på problemstillinger knyttet til plast i det marine miljø i fremtiden.

14 Referanser

- Aarflot JM, Skjoldal HR, Dalpadado P, Skern-Mauritzen M. 2017. Contribution of *Calanus* species to the mesozooplankton biomass in the Barents Sea. ICES J Mar Sci. doi:10.1093/icesjms/fsx221
- Allen JT, Brown L, Sanders R, Moore CM, Mustard A, Fielding S, Lucas M, Rixen M, Savidge G, Henson S, Mayor D. 2005. Diatom carbon export enhanced by silicate upwelling in the northeast Atlantic. *Nature*. 437, 728-732.
- Anisimova NA, Jørgensen LL, Lubin P, Manushin I. 2010. Mapping and monitoring of benthos in the Barents Sea and Svalbard waters: Results of the joint Russian Norwegian Benthic Vulnerability of megabenthic species to trawling in the Barents Sea Benthic Program 2006–2008. IMR/PINRO Joint Report Series 2009(1). 114 pp.
- Anisimova NA, Jørgensen LL, Lubin P, Manushin I. 2011. Benthos. In Jakobsen T. & Ozhigin V. (Eds.) *The Barents Sea Ecosystem: Russian-Norwegian Cooperation in research and management*, Chapter 4.1.2.
- Bailey A, Thor P, Browman HI, Fields DM, Runge J, Vermont A, Bjelland R, Thompson C, Shema S, Durif CMF, Hop H. 2016. Early life stages of the Arctic copepod *Calanus glacialis* are unaffected by increased seawater pCO₂. ICES J Mar Sci. doi: 10.1093/icesjms/fsw066.
- Barber DG, Hop H, Mundy CJ, Else B, Dmitrenko IA, Tremblay J-E, Ehn JK, Assmy P, Daase M, Candlish LM, Rysgaard S. 2015. Selected physical, biological and biogeochemical implications of a rapidly changing Arctic Marginal Sea Ice Zone. *Prog Oceanogr*. 139, 122-150.
- Bednaršek N, Tarling GA, Fielding S, Bakker DCE. 2012. Population dynamics and biogeochemical significance of *Limacina helicina antarctica* in the Scotia Sea (Southern Ocean). *Deep-Sea Res II*. 59-60, 105–116.
- Bednaršek N, Tarling GA, Bakker DCE, Fielding S, Feely RA. 2014. Dissolution dominating calcification process in polar pteropods close to the point of aragonite undersaturation. *PLoS ONE*. 9(10), e109183.
- Belkin IM, Cornillon PC, Sherman K. 2009. Fronts in large marine ecosystems. *Prog Oceanogr*. 81, 223–236.
- Bost CA, Cotté C, Bailleul F, Cherel Y, Charrassin JB, Guinet C, Ainley DG, Weimerskirch H. 2009. The importance of oceanographic fronts to marine birds and mammals of the southern oceans. *J Mar Sys*. 78, 363-376.
- Buhl-Mortensen P, Buhl-Mortensen L. 2018. Impacts of Bottom Trawling and Litter on the Seabed in Norwegian Waters. *Front Mar Sci*. 5, 42. doi: 10.3389/fmars.2018.00042
- Carroll ML, Carroll J. 2003. The Arctic Seas. Pp. 127-156 in Black K. & Shimmield G. (eds.) *Biogeochemistry of Marine Systems*, Blackwell Publ Ltd, Oxford.
- Carroll ML, Ambrose Jr WG, Locke WLV, Ryan SK, Johnson BJ. 2014. Bivalve growth rate and isotopic variability across the Barents Sea Polar Front. *J Mar Sys*. 130, 167–180.
- Carroll J, Vikebø F, Howell D, Broch OJ, Nepstad R, Augustine S, Skeie GM, Bast R, Juselius J. 2018. Assessing impacts of simulated oil spills on the Northeast Arctic cod fishery. *Mar Pollut Bull*. 126, 63-73.
- Chierici M, Skjelvan I, Norli M, Jones E, Børsheim KY, Lauvset SK, Lødemel HH, Sørensen K, King AL, Johannessen T. 2017. Monitoring ocean acidification in Norwegian seas in 2016, Report, Miljødirektoratet, M-776|2017
- Cole M, Lindeque P, Halsband C, Galloway TS. 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Mar Pollut Bull*. 62(12), 2588-2597.
- Coyle KO, Hunt GL Jr, Decker MB, Weingartner TJ. 1992. Murre, foraging, epibenthic sound scattering and tidal advection over a shoal near St. Bering Sea. *Mar Ecol Progr Ser*. 83, 1-14
- Crozar A, Marti E, Duarte CM, Garcia-de-Lomas J, van Sebille E, Ballatore TJ, Eguiluz VM, Gonzalez-Gordillo JI, Pedrotti ML, Echevarria F, Trouble R, Irigoien X. 2017. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the thermohaline circulation. *Sci Adv*. 3, e1600582.
- Dalpadado P, Ingvaldsen RB, Stige LC, Bogstad B, Knutsen T, Ottersen G, Ellertsen B. 2012. Climate effects on Barents Sea ecosystem dynamics. ICES J Mar Sci. 69(7), 1303-1316
- Decker MB. 1995. Influences of oceanographic processes on seabird ecology. PhD Thesis, University of California, Irvine 175pp
- Descamps S, Strøm H, Steen H. 2013. Decline of an Arctic top predator: synchrony in colony size fluctuations,

- risk of extinction and the subpolar gyre. *Oecologia*. doi: 10.1007/s00442-013-2701-0
- Drinkwater KF, Tande K (Eds.). 2014. *Biophysical Studies of the Polar Front in the Barents Sea and the Arctic Front in the Norwegian Sea: Results from the NESSAR Project*. *J Mar Sys*. 130, 131-262.
- Dobrynin M, Pohlmann T. 2015. Anomalous hydrographic conditions in the western Barents Sea observed in March 2014. *Cont Shelf Res*. 111, 69-82
- Eiane K, Tande KS, Sakshaug E, Johnsen G, Kovac K. 2009. Meso and macrozooplankton. In: *Ecosystem Barents Sea*, Tapir Academic Press, Trondheim, pages 209-234, 587pp.
- Ellertsen B, Hassel A, Loeng H, Rey F, Tjelmeland S, Slagstad D. 1982. Økologiske undersøkelser nær iskanten i Barentshavet somrene 1979 og 1980. *Fisken og Havet*. 1982/3, 31-83
- Erga SR, Ssebiyonga N, Hamre B, Frette Ø, Rey F, Drinkwater KF. 2014. Nutrients and phytoplankton biomass distribution and activity at the Barents Sea Polar Front during summer near Hopen and Storbanken. *J Mar Sys*. 130, 181-192
- Eriksen E, Dalpadado P. 2011. Long-term changes in Krill biomass and distribution in the Barents Sea: are the changes mainly related to capelin stock size and temperature conditions? *Polar Biol*. 34(9), 1399-1409
- Eriksen E, Prozorkevich D, Trofimov A, Howell D. 2012. Biomass of Scyphozoan Jellyfish, and its Spatial Association with 0-Group Fish in the Barents Sea. *PLoS ONE*. 7(3), e33050
- Estep KW, Nejstgaard JC, Skjoldal HR, Rey F. 1990. Predation by copepods upon natural populations of *Phaeocystis pouchetii* as a function of the physiological state of the prey. *Mar Ecol Prog Ser*. 67, 235-249.
- Fall J, Skern-Mauritzen M. 2014. White-beaked dolphin distribution and association with prey in the Barents Sea. *Mar Biol Res*. 10(10), 957-971
- Fauchald P, Ziryanov SV, Strøm H, Barrett RT. 2011. Seabirds of the Barents Sea. Pp 373-394 in Jakobsen, T. and Ozhigin, V.K., (eds) *The Barents Sea: Ecosystem, Resources, Management*. Tapir Academic Press, Trondheim, Norway
- Fauchald P, Barrett RT, Bustnes JO, Erikstad KE, Nøttestad L, Skern-Mauritzen M, Vikebø FB. 2015. Sjøfugl og marine økosystemer. Status for sjøfugl og sjøfuglenes næringsgrunnlag i Norge og på Svalbard. NINA Rapport 1161, 44 pp.
- Fer I, Drinkwater KF. 2014. Mixing in the Barents Sea Polar Front near Hopen in spring. *J Mar Sys*. 130, 206-218.
- Fluhr J, Strøm H, Pradel R, Duriez O, Beaugrand G, Descamps S. 2017. Weakening of the subpolar gyre as a key driver of North Atlantic seabird demography: a case study with Brünnich's guillemots in Svalbard. *Mar Ecol Prog Ser*. 563, 1-11.
- Folkow LP, Nordøy ES, Blix AS. 2014. Distribution and diving behaviour of harp seals (*Pagophilus groenlandicus*) from the Greenland Sea stock. *Polar Biol*. 27, 281-298
- Fossheim M, Nilssen EM, Aschan M. 2006. Fish assemblages in the Barents Sea. *Mar Biol Res*. 2(4), 260-269
- Fossheim M, Primicerio R, Johannesen E, Ingvaldsen RB, Aschan MM, Dolgov AV. 2015. Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic. *Nat Clim Change*. 5, 673-677
- Franks PJS. 1992. Sink or swim – Accumulation of biomass at fronts. *Mar Ecol Prog Ser*. 82, 1-12
- Freitas C, Kovacs KM, Ims RA, Fedak MA, Lydersen C. 2008. Ringed seal post-moulting movement tactics and habitat selection. *Oecologia*. 155, 193-214
- Frommel AY, Maneja R, Lowe D, Malzahn AM, Geffen AJ, et al. 2012 Severe tissue damage in Atlantic cod larvae under increasing ocean acidification. *Nat Clim Change* 2: 42-46.
- Førland EJ (ed.) 2009. Climate development in North Norway and the Svalbard region during 1900-2100. Norsk Polarinstitutt Rapportserie 128, 45pp.
- Gabrielsen GW. 2009. Seabirds in the Barents Sea. Pp415-452 in Sakshaug, E., Johnsen, G. and Kovacs, K. (eds) *Ecosystem Barents Sea*. Tapir Academic Press, Trondheim, Norway
- Gawarkiewicz G, Plueddemann AJ. 1994. Where the Arctic meets the North Atlantic: exploring the Barents Sea Polar Front. *Oceanus*. 37, 17-20

- Gawarkiewicz G, Plueddemann AJ. 1995. Topographic control of thermohaline frontal structure in the Barents Sea Polar Front on the south flank of Spitsbergen Bank, *J Geophys Res.* 100, 4509–4524.
- Gjøsæter et al., 1983. Marinøkologiske undersøkelser nær iskanten i Barentshavet somrene 1979-1982. Sluttrapport for prosjektet "Lodda på sommerbeite". Havforskningsinstituttet Rapport FO 8309, 59pp
- Gjøsæter H, Hassel A, Loeng H, Rey F, Skjoldal HR. 1983. Intern toktrapport. Havforskningsinstituttet Rapport. 21pp + 6pp appendiks.
- Godø OR, Samuelsen A, Macaulay G, Patel R, Hjøllo SS, Horne J, Kaartvedt S, Johannessen J. 2012. Mesoscale eddies are oases for higher trophic marine life. *PLoS ONE.* 7, e30161
- Grebmeier JM, Overland JE, Moore SE, Farley EV, Carmack EC, Cooper LW, Frey KE, Helle JH, McLaughlin FA, McNutt L. 2006. A major ecosystem shift in the northern Bering Sea. *Science.* 311, 1461-1464.
- Gregory MR. 2009. Environmental implications of plastic debris in marine settings – entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philos T Roy Soc B.* 364(1526), 2013-2025.
- Grøsvik BE, Prokhorova T, Eriksen E, Krivosheya P, Horneland PA, Prozorkevich D. 2018. Assessment of Marine Litter in the Barents Sea, a Part of the Joint Norwegian–Russian Ecosystem Survey. *Front Mar Sci.* 5, 72.
- Hamilton CD, Lydersen C, Ims RA, Kovacs KM. 2015. Predictions replaced by facts: a keystone species' behavioural responses to declining arctic sea-ice. *Biol Lett.* 11, 20150803, 6pp
- Hampton I. 1985. Abundance, distribution and behaviour of *Euphausia superba* in the Southern Ocean between 15° and 30° E during FIBEX. In: Siegfried WR, Condy PR, Laws RM (Eds.), *Antarctic Nutrient Cycles and Food Webs.* Springer, Berlin, pp. 294-303.
- Hansen AS, Nielsen TG, Levinsen H, Madsen SD, Thingstad TF, Hansen BW. 2003. Impact of changing ice cover on pelagic productivity and food web structure in Disko Bay, West Greenland: A dynamic model approach. *Deep-Sea Res I.* 50, 171_87.
- Hassel A, Loeng H, Rey F, Skjoldal HR. 1984a. Preliminære resultater fra tokt med F/F "G.O. Sars" i Barentshavet, 28.5.-18.6.1984. Havforskningsinstituttet Rapport FO .8409, 34pp + 7 appendiks
- Hassel A, Loeng H, Rey F, Solberg T. 1984b. Preliminære resultater fra tokt med F/F "G.O. Sars" i Barentshavet, 4-19.8.1984. Havforskningsinstituttet Rapport FO .8410, 32pp + 3 appendiks
- Hassel A, Loeng H, Skjoldal HR. 1986. Marinøkologiske undersøkelser i Barentshavet i januar 1985. Havforskningsinstituttet Rapport FO 8604, 33pp + 4 appendiks
- Hátún H, Azetsu-Scott K, Somavilla R, Rey F, Johnson C, Mathis M, Mikolajewicz U, Coupel P, Tremblay J-É, Hartman S, Pacariz SV, Salter I, Ólafsson J. 2017. The subpolar gyre regulates silicate concentrations in the North Atlantic. *Sci Rep.* 7, 14576.
- Haug T, Bogstad B, Chierici M, Gjøsæter H, Hallfredsson EH, Høines ÅS, Hoel AH, Ingvaldsen RB, Jørgensen LL, Knutsen T, Loeng H, Naustvoll L-J, Røttingen I, Sunnanå K. 2017. Future harvest of living resources in the Arctic Ocean north of the Nordic and Barents Seas: a review of possibilities and constraints. *Fish Res.* 188, 38-57.
- Hildebrandt N, Niehoff B, Sartoris FJ. 2014. Long-term effects of elevated CO₂ and temperature on the Arctic calanoid copepods *Calanus glacialis* and *C. hyperboreus*. *Mar Pollut Bull.* 80, 59-70.
- Hjermann DØ, Melsom A, Dingsør GE, Durant JM, Eikeset AM, Røed LP, Ottersen G, Storvik G, Stenseth NC. 2007. Fish and oil in the Lofoten-Barents Sea system: synoptic review of the effect of oil spills on fish populations. *Mar Ecol Prog Ser.* 339, 283-299.
- Hunt Jr. GL, Blanchard AL, Boveng P, Dalpadado P, Drinkwater KF, Eisner L, Hopcroft RR, Kovacs KM, Norcross BL, Renaud P, Reigstad M, Renner M, Skjoldal HR, Whitehouse A, Woodgate RA. 2013. The Barents and Chukchi Seas: Comparison of two Arctic shelf ecosystems. *J Mar Sys.* 109-110, 43-68
- ICES. 2017. Report of the Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea. WGIBAR 2017 Report 16-18 March 2017. Murmansk, Russia. ICES CM 2017/SSGIEA:04. 186pp
- ICES. 2018. Interim Report of the Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR). WGIBAR 2018 REPORT 9-12 March 2018. Tromsø, Norway. ICES CM 2018/IEASG:04. 210 pp.
- IPPC, 2001. Climate Change 2001: The scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 881p

- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.) Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 747-847.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.) Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Johannessen E, Ingvaldsen R, Bogstad B, Dalpadado P, Eriksen E, Gjøsæter H, Knutsen T, Skern-Mauritzen M, Stiansen JE. 2012. Changes in Barents Sea ecosystem state, 1970-2009: climate fluctuations, human impact, and trophic interactions. *ICES J Mar Sci.* 69, 880-889
- Johannessen OM, Foster LA. 1978. Note on topographically controlled oceanic polar front in the Barents Sea. *J Geophys Res.* 83, 4567-4571
- Jørgensen LL, Ljubin P, Skjoldal HR, Ingvaldsen RB, Anisimova N, Manushin I. 2015a. Distribution of benthic megafauna in the Barents Sea: baseline for an ecosystem approach to management. *ICES J Mar Sci.* 72 (2), 595-613.
- Jørgensen LL, Planque B, Thangstad TH, Certain G. 2015b. Vulnerability of megabenthic species to trawling in the Barents Sea. *ICES J Mar Sci.* doi: 10.1093/icesjms/fsv107.
- Keogan K, et al. 2018. Global phenological insensitivity to shifting ocean temperatures among seabirds. *Nat Clim Change.* 8, 313-318
- Kinder TH, Hunt GL Jr, Schneider DC, Schumacher JD. 1983. Correlations between seabirds and oceanic fronts around the Pribilof Islands, Alaska. *Estuar Coast Shelf Sci.* 16, 209-219
- Kosobokova K, Hirche H-J. 2009. Biomass of zooplankton in the eastern Arctic Ocean – A baseline study. *Progr Oceanogr.* 82, 265-280
- Kuletz KJ, Ferguson MC, Hurley B, Gall AE, Labunski EA, Morgan TC. 2015. Seasonal spatial patterns in seabird and marine mammal distribution in the eastern Chukchi and western Beaufort seas: Identifying biologically important pelagic areas. *Prog Oceanogr.* 136, 175-200
- Kværner J, Swensen G, Erikstad L. 2006. Assessing environmental vulnerability in EIA – the content and context of the vulnerability concept in an alternative approach to standard EIA procedure. *Environ Impact Assess.* 26(5), 511-527.
- Landa CS, Ottersen G, Sundby S, Dingsør GE, Stiansen JE. 2014. Recruitment, distribution boundary and habitat temperature of an arcto-boreal gadoid in a climatically changing environment: a case study on Northeast Arctic haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). *Fish Oceanogr.* 23, 506-520
- Le Fèvre J. 1986. Aspects of the biology of frontal systems. *Adv Mar Biol.* 23, 163-299.
- Lien VS, Vikebø FB, Skagseth Ø. 2013a. One mechanism contributing to co-variability of the Atlantic inflow branches to the Arctic. *Nat Commun.* 4, 1488.
- Lien VS, Gusdal Y, Albretsen J, Melsom A, Vikebø FB. 2013b. Evaluation of a Nordic Seas 4 km numerical ocean model hindcast archive (SVIM), 1960-2011. *Fisken og Havet.* 7, 82pp
- Lien VS, Ådlandsvik B. 2013. Can dense water formation act as a primer for the spring-bloom on Spitsbergenbanken? Poster presentert under ICES Annual Science Conference 23-27. Sep, 2013, Reykjavik, Island. *ICES CM 2013 L16*
- Lien VS, Ådlandsvik B. 2014. Bottom water formation as a primer for spring-blooms on Spitsbergenbanken? *J Mar Sys.* 130, 241-247
- Lien VS, Gusdal Y, Vikebø FB. 2014. Along-shelf hydrographic anomalies in the Nordic Seas (1960-2011): Locally generated or advective signals? *Ocean Dynam.* 64, 1047-1059.
- Lien VS, Hjøllø SS, Skogen MD, Svendsen E, Wehde H, Bertino L, Counillon F, Chevallier M, Garric G. 2016: An assessment of the added value from data assimilation on modelled Nordic Seas hydrography and ocean transports. *Ocean Model.* 99, 43-59
- Lien VS, Schlichtholz P, Skagseth Ø, Vikebø FB. 2017. Wind-driven Atlantic water flow as a direct mode for reduced Barents Sea ice cover. *J Climate.* 30, 803-812.

- Lien VS, Budgell WP. 2018. Evaluation of a NEMO hindcast in the Arctic region. HITRA 1/2018, Institute of Marine Research, Norway, 26 pp.
- Lind S, Ingvaldsen RB. 2012. Variability and impacts of Atlantic Water entering the Barents Sea from the north. *Deep-Sea Res I*. 62, 70-88
- Lind S, Ingvaldsen RB, Furevik T. 2018. Declining sea ice import and freshwater loss causes Arctic warming hotspot. *Nat Clim Change*. 8, 634-639
- Lochte K, Pfannkuche O. 1987. Cyclonic cold-core eddy in the eastern North-Atlantic. 2. Nutrients, phytoplankton and bacterioplankton. *Mar Ecol Prog Ser*. 39, 153–164.
- Loeng H. 1979. Isforholdene i Barentshavet og vest av Spitsbergen. En oversikt. *Fisken og Havet*, 1979 (2), 29-75.
- Loeng H, Vinje T. 1979. On the sea ice conditions in the Greenland and Barents Seas. p.163-176 in (ANON, ed.) *POAC 79. Proceedings of the fifth international conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. The Norwegian Institute of Technology, Trondheim.
- Loeng H. 1991. Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea. *Polar Res*. 10 (1), 5–18.
- Loeng H, Drinkwater K. 2007. An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability. *Deep-Sea Res II*. 54, 2478–2500.
- Lone K, Merkel B, Lydersen C, Kovacs KM, Aars J. 2017. Sea ice resource selection models for polar bears in the Barents Sea subpopulation. *Ecography*. 41, 567-578
- Manno C, Bednaršek N, Tarling GA, Peck VL, Comeau S, Adhikari D, Bakker CE, Bauerfeind E, Bergan AJ, Berning MI, Buitenhuis BE, Burrige AK, Chierici M, Flöter S, Fransson A, Gardner J, Howes EL, Keul N, Kimoto K, Kohnert P, Lawson GL, Lischka S, Maas S, Mekkes L, Oakes RL, Pebody C, Peijnenburg TCA, Seifert M, Skinner J, Thibodeau PS, Wall-Palmer D, Ziveri P. 2017. Shelled pteropods in peril: Assessing vulnerability in a high CO₂ ocean. *Earth Sci Rev*. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.04.005
- Melle W, Skjoldal HR. 1998. Reproduction and development of *Calanus finmarchicus*, *C. glacialis* and *C. hyperboreus* in the Barents Sea. *Mar Ecol Prog Ser*. 169, 211–228.
- Melsom A, Lien VS, Budgell WP. 2009. Using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) to improve the oceanic circulation from a GCM 20th century simulation. *Ocean Dynam*. 59, 969-981
- Melsom A, Gusdal Y. 2015. Evaluation of model currents from model simulations. MET report 14/2015, 30 pp
- Mehlum F, Nordlund N, Isaksen K. 1998. The importance of the «Polar Front» as foraging habitat for guillemot *Uria* spp. breeding at Bjørnøya, Barents Sea. *J Mar Syst* 14: 27-43.
- Nelson DM, Mccarthy JJ, Joyce TM, Ducklow HW. 1989. Enhanced near-surface nutrient availability and new production resulting from the frictional decay of a Gulf-Stream warm-core ring. *Deep-Sea Res I*. 36, 705–714.
- Nordøy ES, Folkow LP, Potelov V, Prischemikhin V, Blix AS. 2008. Seasonal distribution and dive behaviour of harp seals (*Pagophilus groenlandicus*) of the White Sea – Barents Sea stock. *Polar Biol*. 31, 1119–1135.
- Onarheim IH, Eldevik T, Årthun M, Ingvaldsen RB, Smedsrud LH. 2015. Skillful prediction of Barents Sea ice cover. *Geophys Res Lett*. 42(13), 5364-5371
- Ozhigin V, Ingvaldsen RB, Loeng H, Boitsov V, Karsakov A. 2011. Introduction to the Barents Sea. *The Barents Sea: Ecosystem, Resources, Management: Half a century of Russian-Norwegian Cooperation*. T. Jakobsen and V. Ozhigin, Eds., Tapir Academic Press, 39-76
- Oziel L, Sirven J, Gascard J-C. 2016. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980-2011). *Ocean Sci*. 12, 169-184
- Parson AR. 1985. On the Barents Sea polar front in summer and interpretations of the associated regional oceanography using an Arctic Ocean general circulation model. Doctoral Dissertation, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA. 185pp
- Peck VL, Tarling GA, Manno C, Harper EM, Tynan E. 2016. Outer organic layer and internal repair mechanism protects pteropod *Limacina helicina* from ocean acidification. *Deep-Sea Res II*. 127, 41-52
- Poulain PM, Warn-Varnas A, Niiler PP. 1996. Near surface circulation of the Nordic Seas as measured by Lagrangian drifters. *J Geophys Res*. 101, 18237-18258

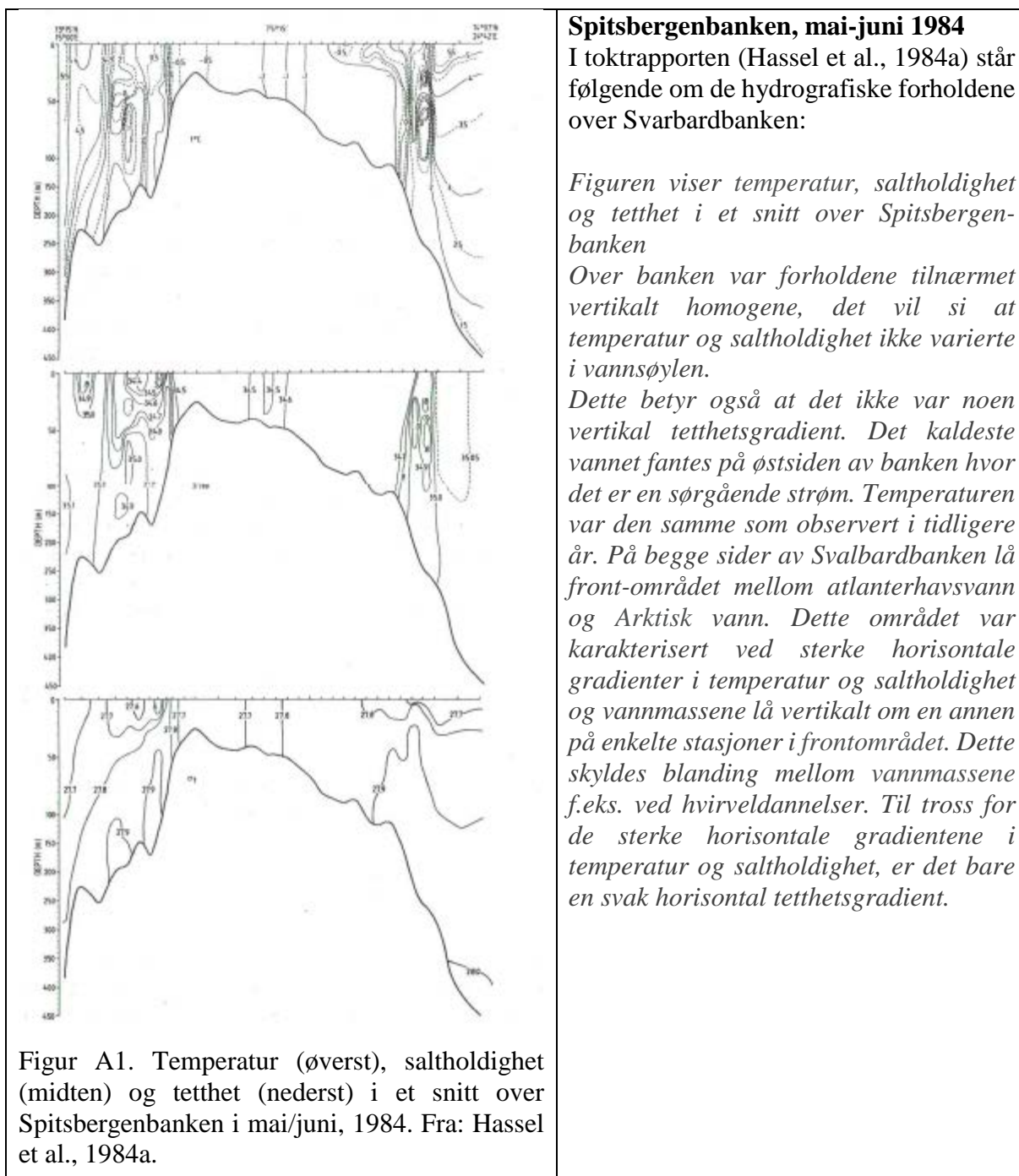
- Reigstad M, Carroll J, Slagstad D, Ellingsen I, Wassmann P. 2011. Intra-regional comparison of productivity, carbon flux and ecosystem composition within the northern Barents Sea. *Prog Oceanogr.* 90, 33–46.
- Ressler PH, Dalpadado P, Macaulay GJ, Handegard N, Skern-Mauritzen M. 2015. Acoustic surveys of euphausiids and models of baleen whale distribution in the Barents Sea. *Mar Ecol Prog Ser.* 527, 13-29
- Rey F, Skjoldal HR, Slagstad D. 1987. Primary production in relation to climatic changes in the Barents Sea. In: Loeng, H. (Ed.), *The Effect of Oceanographic Conditions on Distribution and Population Dynamics of Commercial Fish Stocks in the Barents Sea.* Bergen, Institute of Marine Research, pp. 29–46.
- Rey F. 2012. Declining silicate concentrations in the Barents Sea. *ICES J Mar Sci.* 69(2), 208–212
- Røed LP, Lien V, Melsom A, Kristensen NM, Gusdal Y, Ådlandsvik B, Albretsen J. 2015. BaSIC Technical Report no. 4, Part I: Evaluation of the BaSIC4 long term hindcast results. MET Report 5/2015, Norwegian Meteorological Institute, Norway
- Røed LP, Lien V, Melsom A, Kristensen NM, Gusdal Y, Ådlandsvik B, Albretsen J. 2015. BaSIC Technical Report no. 4, Part II: Addendum. MET Report 6/2015, Norwegian Meteorological Institute, Norway.
- Sakshaug E, Hopkins CCE, Øritsland NA (Eds.). 1991. *Proceedings of the Pro Mare Symposium on Polar Marine Ecology, Trondheim 12-16 May 1990.* Polar Res. 10(1-2), 662p
- Sakshaug E (red.). 1992. Økosystem Barentshavet. 304 pp. ISBN: 8290565178.
- Sandø AB, Melsom A, Budgell WP. 2014. Downscaling IPCC control run and future scenario with focus on the Barents Sea. *Ocean Dynam.* 64(7), 927-949
- Schneider DC, Harrison NM, Hunt GL Jr. 1990. Seabird diets at a front near the Pribilof Islands, Alaska. *Stud. Avian Biol.* 14, 61-66
- Shchepetkin AF, McWilliams JC. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Model.* 9, 347-404.
- Skagseth Ø, Furevik T, Ingvaldsen R, Loeng H, Mork KA, Orvik KA, Ozhigin V. 2008. Volume and Heat Transports to the Arctic Ocean via the Norwegian and Barents Seas. in: Dickson, R., Meincke, J., Rhines, P. (Eds.), *Arctic Subarctic ocean fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate.* Springer, New York, pp. 45-64.
- Skern-Mauritzen M, Skaug HJ, Øien N. 2009. Line transects, environmental data and GIS: Cetacean distribution, habitat and prey selection along the Barents Sea shelf edge. *NAMMCO Sci Publ.* 7, 179-200.
- Skern-Mauritzen M, Johannesen E, Bjørge A, Øien N. 2011. Baleen whale distributions and prey associations in the Barents Sea. *Mar Ecol Prog Ser.* 426, 289-301
- Skjoldal HR, Rey F. 1989. Pelagic production and variability of the Barents Sea ecosystem. In: Sherman, K., Alexander, L.M. (Eds.), *Biomass Yields and Geography of Large Marine Ecosystems.* AAAS selected Symposium, 111. Westview Press, Inc., Colorado, USA, pp. 241–286.
- Skjoldal HR, Hassel A, Rey F, et al. 1987. Spring phytoplankton development and zooplankton reproduction in the central Barents Sea in the period 1979–1984. In: Loeng, H. (Ed.), *The Effect of Oceanographic Conditions on Distribution and Population Dynamics of Commercial Fish Stocks in the Barents Sea.* Proceedings of the Third Soviet–Norwegian Symposium, Murmansk, 26–28 May 1986, pp. 59–89.
- Slagstad D, Støle-Hansen K, Loeng H. 1990. Density driven currents in the Barents Sea calculated by a numerical model. *Modeling, Identification and Control.* 11(4), 181–190.
- Slagstad D, Stokke S. 1994. Simulering av strømfelt, hydrografi, isdekke og primærproduksjon i det nordlige Barentshav. *Fisken & Havet.* 9/1994, 47pp.
- Slagstad D, McClimans TA. 2005. Modelling the ecosystem dynamics of the Barents Sea including the marginal ice zone: I. Physical and chemical oceanography. *J Mar Sys.* 58(1–2), 1–18.
- Smedsrud LH, Esau I, Ingvaldsen RB, Eldevik T, Haugan PM, Li C, Lien VS, Omar AM, Otterå OH, Risebrobakken B, Sandø AB, Semenov VA, Sorokina SA. 2013. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Rev Geophys* 51: 415–449.
- Stiasny, MH, Mittelmayer, FH, Swat, M, Voss, R, Jutfelt, F, et al. 2016. Ocean acidification effects on Atlantic cod larval survival and recruitment to the fished population. *PLoS ONE* 11: e0155448.
- Stiasny MH, Mittermayer FH, Sswat M, Voss R, Jutfelt F, Chierici M, Puvanendran V, Mortensen A, Reusch

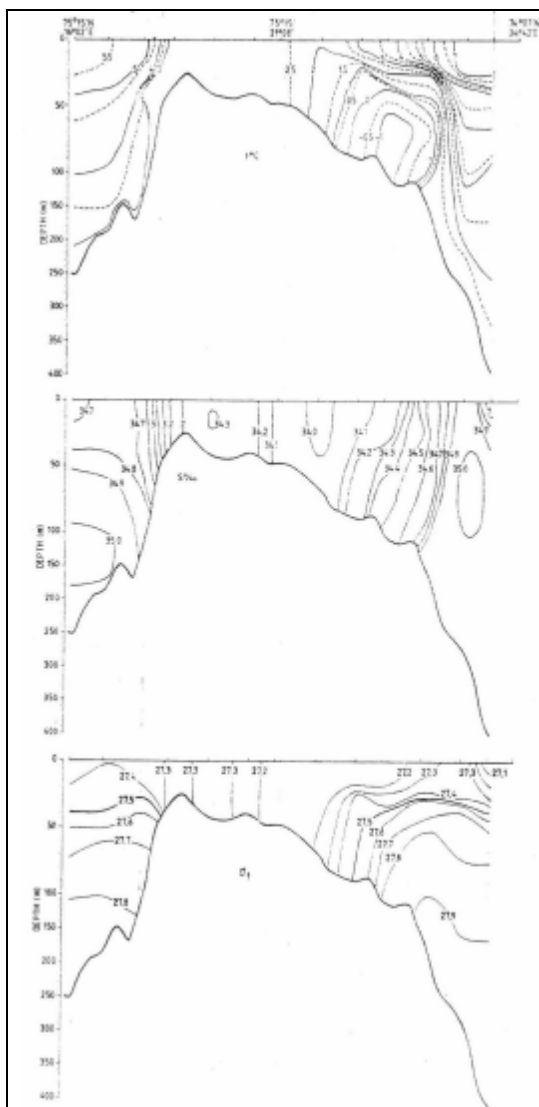
- TBH, Clemmesen C. 2016. Ocean acidification effects on Atlantic cod larval survival and recruitment to the fished population. *PLoS ONE*. 11(8), e0155448
- Støle-Hansen K, Slagstad D. 1991. Simulation of currents, ice melting, and vertical mixing in the Barents Sea using a 3-D baroclinic model. *Polar Res*. 10(1), 33–44.
- Strøm H, Gilg O, Gavrilov M. 2015. Movements of three Arctic populations of ivory gulls revealed by satellite telemetry. Poster presented at the 2nd World Seabird Conference, October 26-30, Cape Town, South Africa
- Sun MY, Clough LM, Carroll ML, Dai JH, Ambrose Jr WG, Lopez GR. 2009. Different responses of two common Arctic macrobenthic species (*Macoma balthica* and *Monoporeia affinis*) to phytoplankton and ice algae: Will climate change impacts be species specific? *J Experimental Mar Biol Ecol*. 376, 110_21.
- Sundfjord A, Fer I, Kasajima Y, Svendsen H. 2007. Observations of turbulent mixing and hydrography in the marginal ice zone of the Barents Sea. *J Geophys Res – Oceans*. 112, C05008
- Sunnanå K, Fosshem M, Olseng CD (red.). 2010. Forvaltningsplan Barentshavet – rapport fra overvåkingsgruppen 2010. Fisken og havet, særnr. 1b-2010.
- Søreide JE, Hop H, Falk-Petersen S, Gulliksen B, Hansen E. 2003. Macrozooplankton communities and environmental variables in the Barents Sea marginal ice zone in late winter and spring. *Mar Ecol Progr Ser*. 263, 43-64
- Søreide JE, Leu E, Berge J, Graeve M, Falk-Petersen S. 2010. Timing in blooms, algal food quality and *Calanus glacialis* reproduction and growth in a changing Arctic. *Global Change Biol*. 16, 3154-3163
- Sørensen L, Sørhus E, Nordtug T, Incardona JP, Linbo TL, Giovanetti L, Karlsen Ø, Meier S. 2017. Oil droplet fouling and differential toxicokinetics of polycyclic aromatic hydrocarbons in embryos of Atlantic haddock and cod. *PLoS ONE*. 12(7): e0180048
- Sørhus E, Edvardsen RB, Karlsen Ø, Nordtug T, van der Meeren T, Thorsen A, Harman C, Jentoft S, Meier S. 2015. Unexpected Interaction with Dispersed Crude Oil Droplets Drives Severe Toxicity in Atlantic Haddock Embryos. *PLoS ONE*. 10(4): e0124376
- Thor P, Bailey A, Halsband C, Guscelli E, Gorokhova E, Fransson A. 2016. Seawater pH predicted for the year 2100 affects the metabolic response to feeding in copepodites of the Arctic copepod *Calanus glacialis*. *PLoS ONE*. 11, e0168735.
- Vihtakari M, Welcker J, Moe B, Chastel O, Tartu S, Hop H, Bech C, Descamps S, Gabrielsen GW. 2018. Black-legged kittiwakes as messengers of Atlantification in the Arctic. *Sci Rep*. 8, 1178
- Vikebø FB, Rønningen P, Lien VS, Meier S, Reed M, Ådlandsvik B. 2013. Spatiotemporal overlap of oil spill and early life stages of fish. *ICES J Mar Sci*. doi: 10.1093/icesjms/fst131
- Vikebø FB, Rønningen P, Meier S, Grøsvik BE, Lien VS. 2015. Dispersants have limited effects on exposure rates of oil spills on fish eggs and larvae in shelf seas. *Environ Sci Technol*. 49, 6061-6069
- von Quillfeldt CH. 2007. Appendix V-i. Special ecological features of the Barents Sea. In: Lesikhina N, Rudaya I, Kireeva A, Krivonos O, Kobets E (Eds). *Offshore Oil and Gas Development in Northwest Russia*. http://www.bellona.org/reports/report/russian_arctic_shelf
- von Quillfeldt CH (red.). 2010. Det faglige grunnlaget for oppdateringen av forvaltningsplanen for Barentshavet og havområdene utenfor Lofoten. *Fisken og havet, Særnummer 1a 2010*.
- von Quillfeldt CH (red.). 2017. Miljøverdier og sårbarhet i iskantsonen. *Kortrapport no. 047, Norsk Polarinstitutt 2018*, 263pp.
- Våge S, Basedow SL, Tande KS, Zhou M. 2014. Physical structure of the Barents Sea Polar Front near Storbanken in August 2007. *J Mar Syst*. 130, 256–262.
- Wassmann P, Reigstad M, Haug T, Rudels B, Carroll ML, Hop H, Gabrielsen GW, Falk-Petersen S, Denisenko SG, Arashkevich E, Slagstad D & Pavlova O. 2006. Food webs and carbon flux in the Barents Sea. *Prog Oceanogr*. 71, 232-287.
- Wassmann P, Kosobokova KN, Slagstad D, Drinkwater KF, Hopcroft RR, Moore SE, Ellingsen I, Nelson RJ, Carmack E, Popova E, Berge J. 2015. The contiguous domains of Arctic Ocean advection: Trails of life and death. *Prog Oceanogr*. 139, 42-65
- Weydmann A, Carstensen J, Goszczko I, Dmoch K, Olszewska A, Kwasniewski S. 2014. Shift towards the

- dominance of boreal species in the Arctic: inter-annual and spatial zooplankton variability in the West Spitsbergen Current. *Mar Ecol Prog Ser.* 501, 41-52.
- Wieczorek AM, Morrison L, Croot PL, Allcock AL, MacLoughlin E, Savard O, Brownlow H, Doyle TK. 2018. Frequency of microplastics in mesopelagic fishes from the Northwest Atlantic. *Front Mar Sci.* 5, 39.
- Wienerroither R, Johannesen E, Dolgov A, Byrkjedal I, Bjelland O, Drevetnyak K, Eriksen KB, Høines Å, Langhelle G, Langøy H, Prokhorova T, Prozorkevich D, Wenneck T. 2011. Atlas of the Barents Sea Fishes. IMR/PINRO Joint Report Series 1-2011, ISSN 1502- 8828. 272pp
- Wienerroither R, Johannesen E, Dolgov A, Byrkjedal I, Aglen A, Bjelland O, Drevetnyak K, Eriksen KB, Høines Å, Langhelle G, Langøy H, Murashko P, Prokhorova T, Prozorkevich D, Smirnov O, Wenneck T. 2013. Atlas of the Barents Sea fishes based on the winter survey. IMR-PINRO Joint Report Series 2-2013. ISSN 1502-8828. 220pp
- Wietek Z, Grelowski A, Wolnomiejski N. 1981. Studies in aggregations of krill (*Euphausiu superba*). *Meeresforschung* 28, 228-243.
- Yang X-Y, Yuan X, Ting M. 2016. Dynamical link between the Barents-Kara Sea ice and the Arctic Oscillation. *J Climate.* 29, 5103-5122
- Øien N. 2009. Distribution and abundance of large whales in Norwegian and adjacent waters based on ship surveys 1995-2001. *NAMMCO Sci Publ.* 7, 31-47
- Årthun M, Eldevik T, Smedsrud LH, Skagseth Ø, Ingvaldsen RB. 2012. Quantifying the Influence of Atlantic Heat on Barents Sea Ice Variability and Retreat. *J Climate.* 25, 4736-4743

Appendix

Oppsummering av resultater fra tokt i Pro Mare-programmet, gjengitt fra toktrapporter (Hassel et al., 1984a,b; 1986). Her følger en oppsummering av de fysiske forholdene gjennom året, basert på tre tokt i mai/juni og august 1984 og januar 1985.





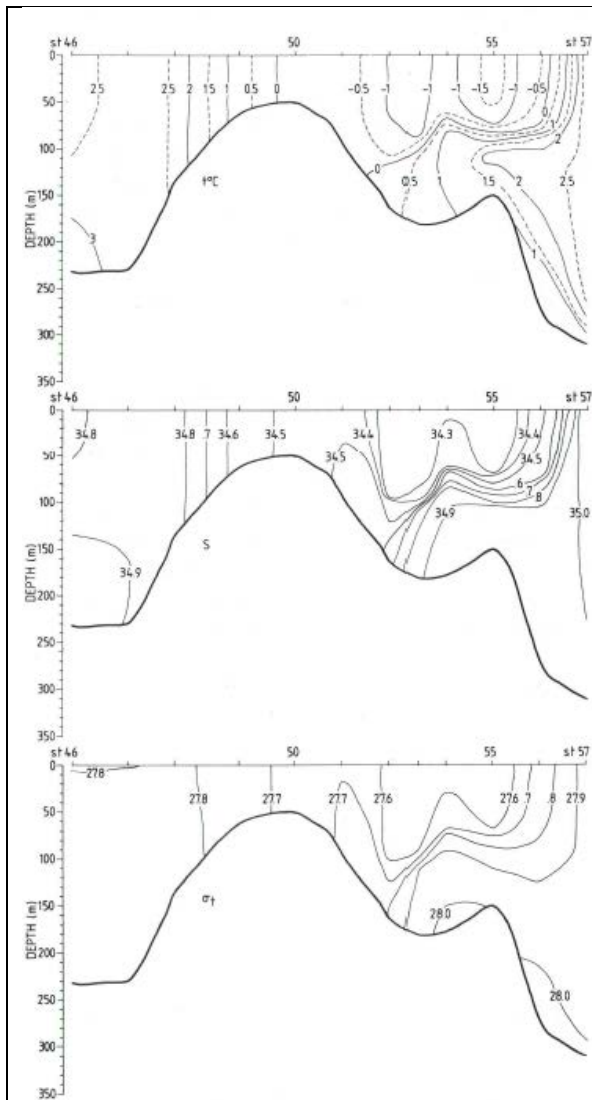
Figur A2. Temperatur (øverst), saltholdighet (midten) og tetthet (nederst) i et snitt over Spitsbergenbanken i august, 1984. Fra: Hassel et al., 1984b.

Spitsbergenbanken, august 1984

Snittet i august var identisk med snittet fra slutten av mai samme år. Hassel et al., 1984b oppsummerte de fysiske forholdene:

Over de grunne partiene (dyp mindre enn 50 m) var vannmassene nesten fullstendig gjennomblandet. Vertikale gradienter fant en først i de dypere partiene i Barentshavet og Norskehavet. På østsiden av Spitsbergenbanken var det en sørvestgående strøm av kaldt arktisk vann. Denne strømmen kommer fra områdene nord for Hopen og fortsetter sørover forbi Bjørnøya. Dette kan tydelig ses i Fig. 5 som viser drivbanen til en satellitt-posisjonert bøye med drivseil i 30 m dyp. Bøyen drev i Polarfronten langs østsiden Svalbardbanken, men i perioder oppholdt den seg relativt lenge i områder med hvirveldannelse, hvor arktisk og atlantisk vann møtes og blandes.

Selv om vannmassene over de grunneste partiene av banken var gjennomblandet som i mai, hadde det foregått store endringer i både temperaturforholdene og saltholdigheten mellom de to toktene. Temperaturen var steget ca. 3°C og var august mellom 2-3°C over de grunne partiene. Saltholdigheten var mellom 0,3-0,5‰ lavere i de samme områdene i august enn i mai/juni. Dette skyldes at vannmassene i august i stor grad består av oppvarmet arktisk vann, som på grunn av issmeltingen, har fått lavere saltholdighet i løpet av sommeren. Den relativt høye temperaturen, gir grunn til å tro at vannmassene må ha oppholdt seg lenge over grunnområdene. Trolig eksisterer det en stor hvirvel midt på banken hvor vannmassene vil oppholde seg over lengre tid.



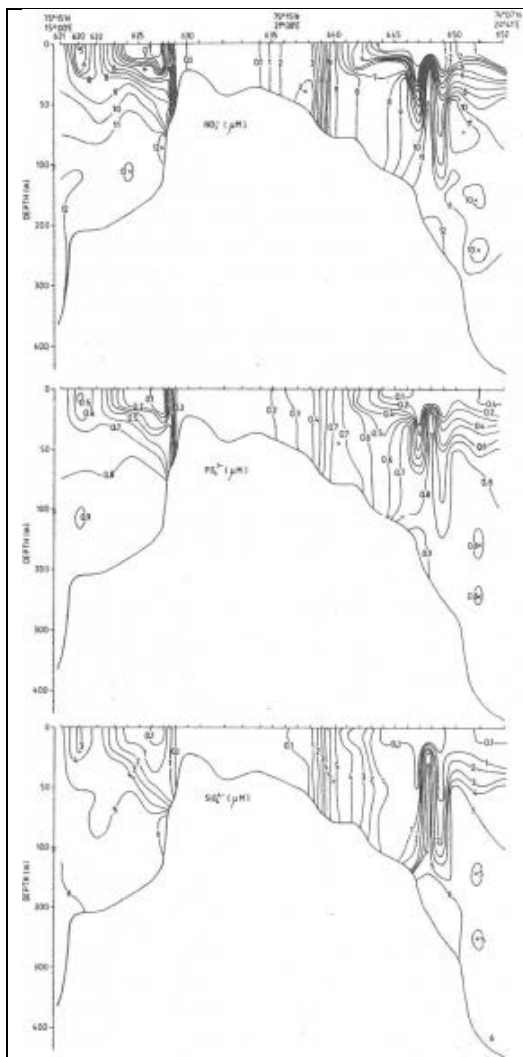
Figur A3. Temperatur (øverst), saltholdighet (midten) og tetthet (nederst) i et snitt over Spitsbergenbanken i januar, 1985. Fra: Hassel et al., 1986.

Spitsbergenbanken, januar 1985

Toktrapporten fra toktet i januar 1985 (Hassel et al., 1986) sier følgende om de fysiske forholdene:

Figuren viser forholdene på snittet som går tvers over Spitsbergenbanken fra Storfjord-renna i vest og ut i Hopenypet i øst. I den vestlige delen av snittet var vannsøylen nesten helt gjennomblandet og det samme var tilfelle for den østligste stasjonen på snittet. Langs østskråningen av Svalbard-banken var forholdene noe mer kompliserte. Det kalde vannet i Bjørnøy-strømmen ($t < -1^{\circ}\text{C}$) gikk mot sør i de øverste ca 70 m. Under denne strømmen fant man atlantehavsvann med betydelig høyere saltholdighet og temperatur. Hvor stabilt dette systemet er, og hvorvidt forholdene holder seg slik hele vinteren, vet man ingenting om.

Her følger en oppsummering av resultater fra innsamling av data på næringsalter, klorofyll-*a* og planteplankton, basert på samme tokt-data som representert ved hydrografiske data over.



Figur A4. Nitrat (øverst), fosfat (midten) og silikat (nederst) i et snitt over Spitsbergenbanken i mai/juni, 1984. Fra: Hassel et al., 1984a.

Spitsbergenbanken, mai-juni 1984

(Hassel et al. 1984a)

Ved den vestlige enden av snittet mot Norskehavet var det høye nærings salt-konsentrasjoner med en tilsvarende lav klorofyll-*a* konsentrasjon. Dette er situasjonen før planteplanktonets våroppblomstring starter i atlantehavsvannet.

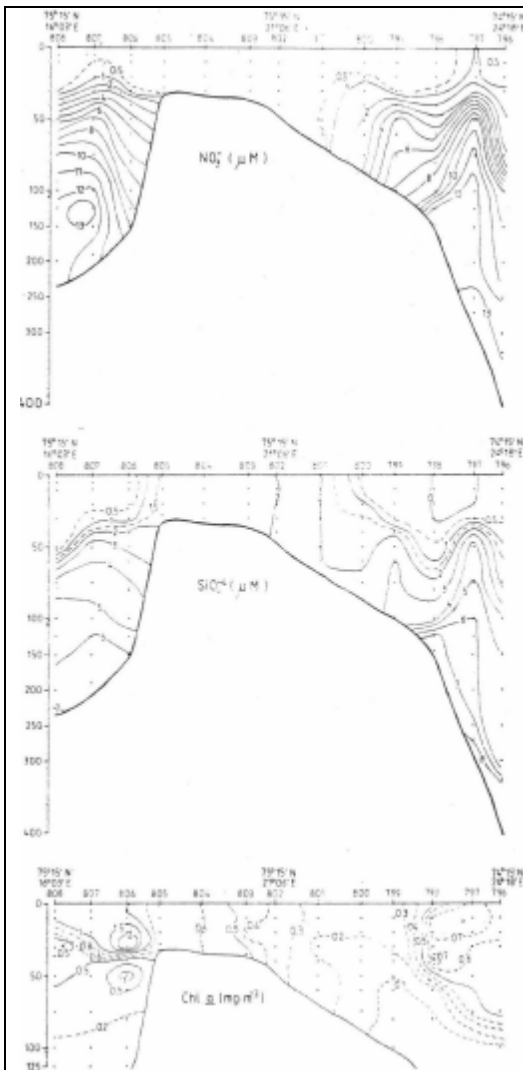
I frontområdet på vestsiden av Svalbardbanken var både de hydrografiske og biologiske forhold ganske kompliserte, særlig i de øverste 50 meter.

I dette front-området med blanding av to vannmasser fant man også store variasjoner i fordelingsmønstrene for nærings salter og klorofyll ~. På stasjonene 624-627 ble det observert lave nærings saltkonsentrasjoner og høye klorofyll ~ verdier. Vannmassen her kan betraktes som oppvarmet arktisk vann, med et betydelig innslag av smeltevann. Hovedkjernen av polarfronten lå omkring st. 628 og var karakterisert av en sterk gradient i nærings saltkonsentrasjonene samt en kraftig økning av klorofyll-*a*. Her var planteplanktonets biomasse dominert av *Chaetoceros socialis* og *Phaeocystis pouchetii*.

Over selve banken (grunnere enn ca. 40 m dyp) var nærings saltkonsentrasjonene ekstremt lave (nær den analytiske deteksjonsgrense). Klorofyll~ verdiene var høye (opptil 15 mg m⁻³) og jevnt fordelt i vannsøylen. I dette området var planteplanktonet dominert av diatomeer som *Rhizosolenia* spp., og *Nitzschia* spp., samt en del *Phaeocystis*. Over det dypere østlige området av banken (ca. 75 m dyp) ble det tredje år på rad observert en sone (st. 640) med mindre biologisk aktivitet (høyere nærings saltkonsentrasjoner og lavere klorofyll ~ verdier) midt i et område karakterisert av en høy biologisk produksjon. Denne sonen forekommer i et område med homogene fysiske forhold og det er fortsatt uklart hvordan den oppstår. Like ved polarfronten, på østsiden av banken (st. 643-646) ble det observert store mengder av klorofyll ~ helt til bunnen. Her kunne man også observere en vertikalgradient i nitrat og fosfat ned til ca. 30 m dyp, mens silikat viste homogene og lave konsentrasjoner i hele vannsøylen. Dette kan fortolkes som en kraftig nedblanding eller sedimentering av planteplanktonet, som var dominert av diatomeer, noe som kan ha forårsaket det store forbruket av silikat. Hvorfor det ikke ble observert et tilsvarende forbruk av de andre nærings saltene er ennå uklart. Ved selve polarfronten (st. 646-649) var både de hydrografiske og biologiske forhold igjen ganske kompliserte. Her kunne man observere lave

konsentrasjoner av næringsalter og klorofyll ~ i de øverste 10-15 meter, noe som tyder på en sen fase i oppblomstringen. Under 20 m dyp var det en tilsynelatende oppstrømning av næringsrikt vann.

Forbi polarfronten, i atlantehavsvannet, kan man igjen se de typiske forholdene ved planteplanktonets våroppblomstring, med høye klorofyll ~ konsentrasjoner og en klar vertikal gradient i næringsaltkonsentrasjonene.



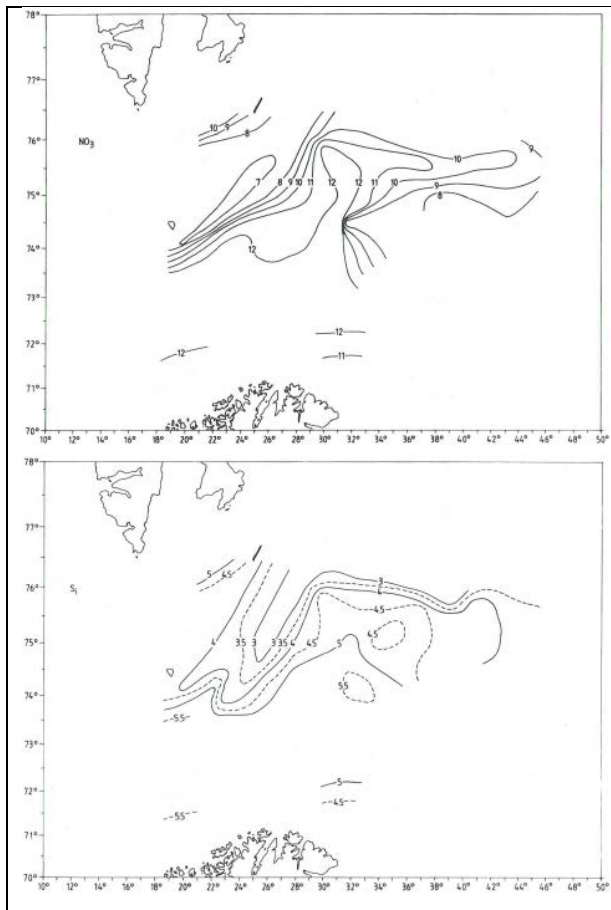
Figur A5. Nitrat (øverst), silikat (midten) og klorofyll-a (nederst) i et snitt over Spitsbergenbanken i august, 1984. Fra: Hassel et al., 1984b.

Spitsbergenbanken, august 1984

(Hassel et al. 1984b)

Vertikalfordelingen av nitrat, silikat og klorofyll ~ er vist i Fig. 4. Vannsøylen var uttømt for nitrat ($< 0.5 \mu\text{M}$) ned til 20 m dyp langs hele snittet og ned til bunnen over selve banken. Et unntak var st. 797 hvor man observerte en heving i nitracinen som konsekvens av et større innslag av atlantehavsvann.

På vestsiden av banken øket nitrat konsentrasjonen jevnt med dypet til et maksimum på ca. $13 \mu\text{M}$ ved ca. 125 m dyp hvor hovedstrømmen av atlantehavsvannet mot nord fant sted. På østsiden av banken nitrat var gradienten noe mer markert og dypere enn på vestsiden, mens atlantehavsvannet kjerne ble funnet på grunnere dyp. Silikat for delingsmønsteret på begge sider av banken var noenlunde det samme som for nitrat, men gradientene lå noe dypere. På selve banken var silikat konsentrasjonen forholdsvis høye ($1-2 \mu\text{M}$) sammenlignet med det forrige toktet. Da var hele vannsøylen uttømt for silikat. Denne økning i silikat konsentrasjonen sannsynligvis skyldes enten transport av arktisk vann fra de områdene rundt Hopen, hvor man tidligere har observert resuspensjon av uorganisk materiale fra havbunnen eller at denne resuspensjon finner sted over hele banken. Klorofyll ~ konsentrasjoner var lave over hele banken og østover, mens på vestsiden var det fortsatt en del klorofyll igjen ($1-2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$).



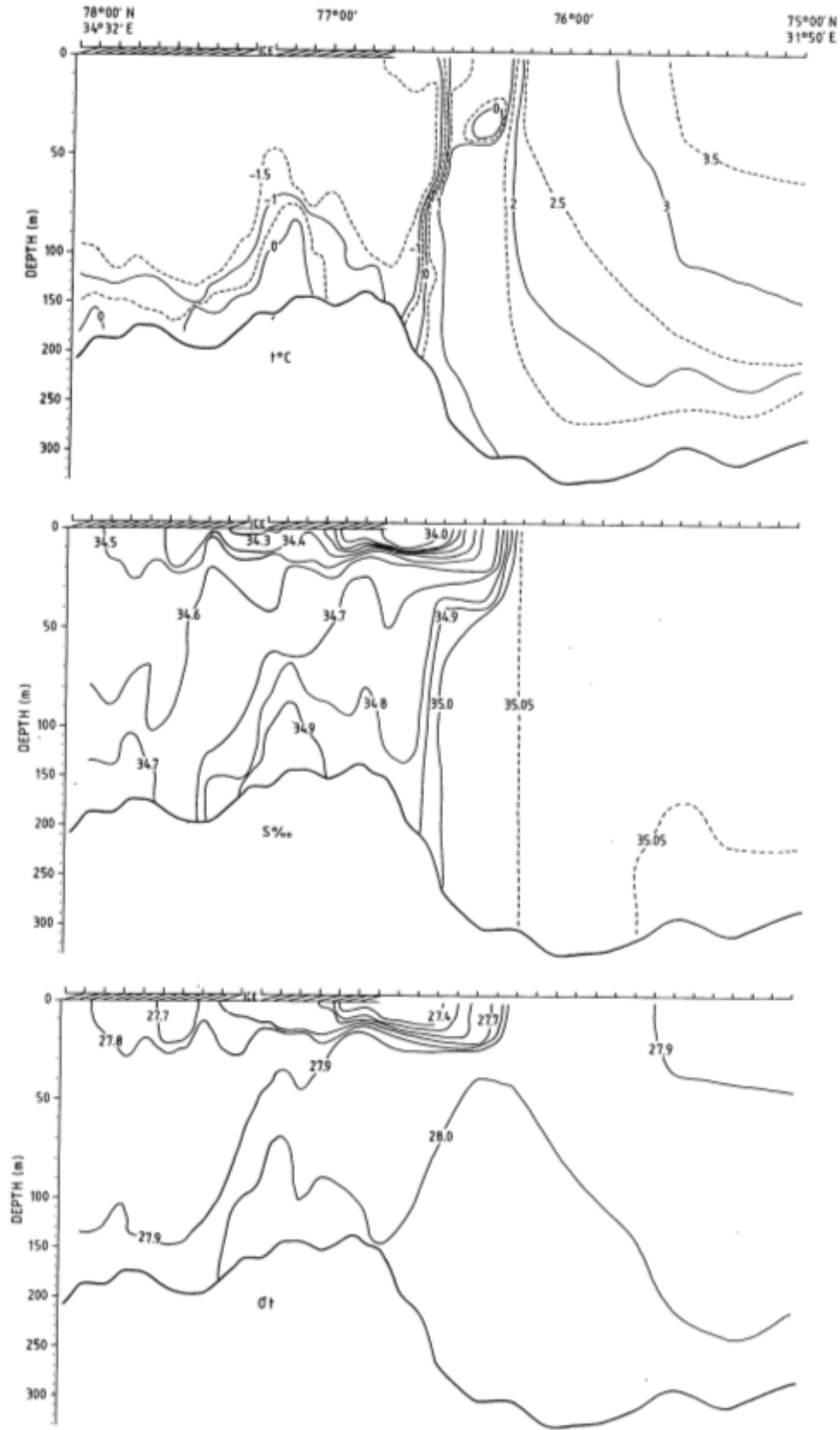
Figur A6. Horisontalfordeling av nitrat (øverst) og silikat (nederst) basert på midlere konsentrasjoner i det gjennomblandede laget. Fra Hassel et al., 1984b.

Utdrag fra tokrapporten:

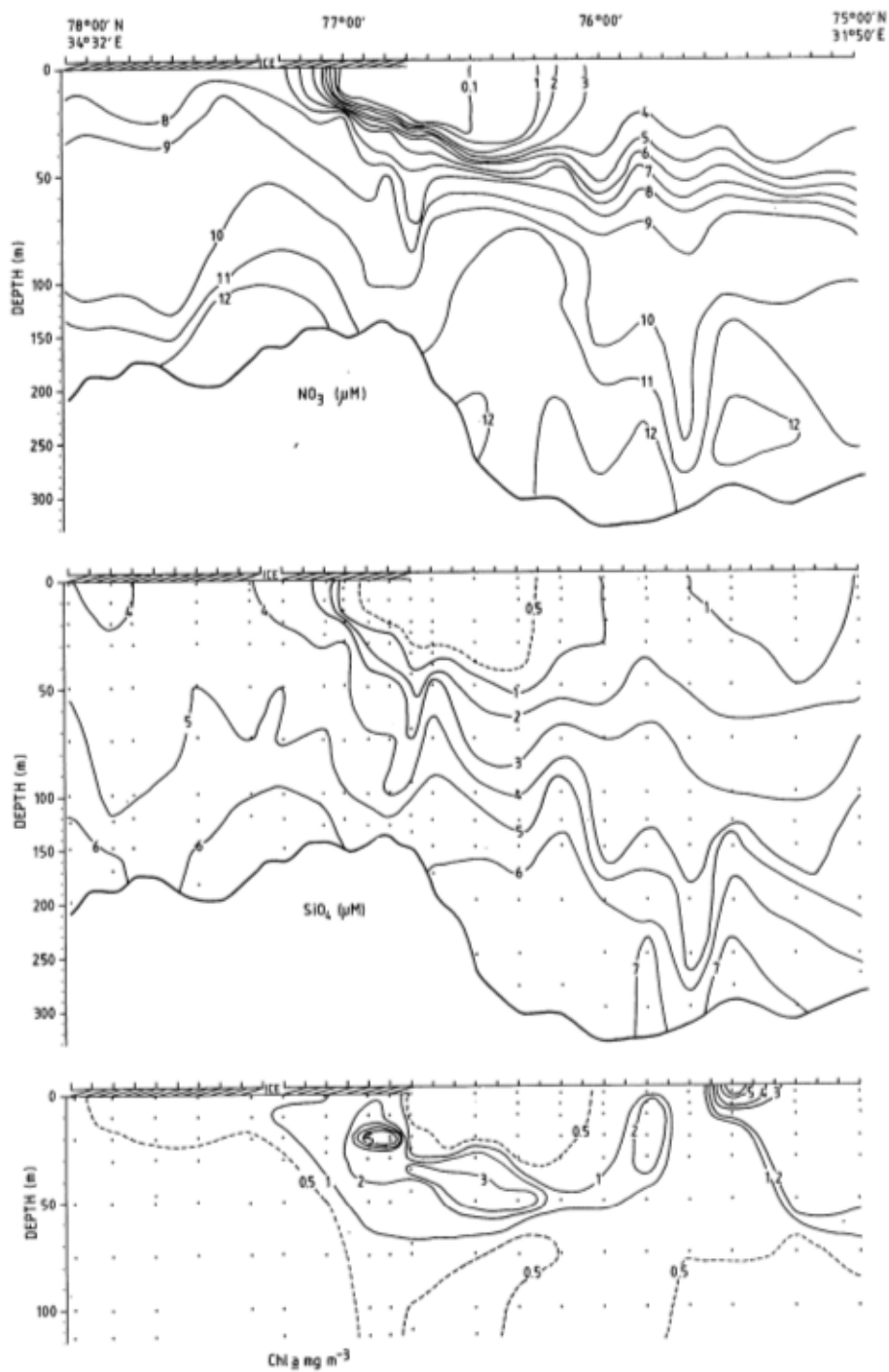
Hovedtrekkene i disse fordelingene følger de fysiske forhold med de skarpeste horisontale gradienter i frontområdet mellom hoved-vannmassene.

Næringssaltkonsentrasjonene var generelt lavere i de Arktiske vannmassene enn i atlantehavsvannet sør for polarfronten. Innholdet av silikat var således $< 3 \mu\text{M}$ i de Arktiske vannmassene. Disse vannmassene var imidlertid sjiktet og silikatinholdet økte sterkt under det gjennomblandede laget.

Polarfronten i vest- og sørkanten av Sentralbanken var markert med hensyn til temperatur, men mindre skarp i saltholdighet. Tilsvarende var det i dette området markerte horisontale gradienter for nitrat men ikke for silikat.



Figur A7. Temperatur (øverst), saltholdighet (midten) og tetthet (nederst) i «Snitt I» fra Hopendypet (sør - høyre) til Storbanken (nord - venstre) i juni 1983. Fra: Gjøsæter et al., 1983.



Figur A8. Nitrat (øverst), silikat (midten) og klorofyll-*a* (nederst) i «Snitt I» fra Hopen-dypet (sør - høyre) til Storbanken (nord - venstre) i juni 1983. Fra: Gjøsæter et al., 1983.

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

HAVFORSKNINGSINSTITUTTET
Institute of Marine Research

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

www.hi.no

