



Prosjektrapport: Del 1

Foraminiferer som miljøindikator for vannkvalitet og levevilkår på sjøbunnen i Indre Oslofjord

Av Jane Dolven, Elisabeth Alve og Silvia Hess

SAMMENDRAG

Tidligere undersøkelser i Indre Oslofjord har vist at bunnlevende foraminiferer (meiofauna) reflekterer miljøforholdene de lever i og kan dermed brukes til å gi informasjon om økologisk tilstand og levevilkår på sjøbunnen. For å kartlegge dagens tilstand i Indre Oslofjord og like utenfor Drøbaksterskelen, og å si noe om utviklingstrenden i fjordsystemet, ble det i oktober 2017 samlet inn bunnsedimenter på 12 stasjoner. Bunnsedimentene ble undersøkt med hensyn på levende foraminiferfaunaer, kornfordeling, total organisk karbon og C/N-forhold. I tillegg ble det gjennomført hydrografiske målinger (temperatur, salinitet og oksygen) gjennom vannsøylen på hver av stasjonene.

Resultatene viser at den økologiske tilstanden (nEQR) er Svært god (tilstandsklasse I) utenfor Drøbaksterskelen og innover i Vestfjorden. Deretter forringes tilstanden gradvis innover i fjorden til Bunnfjorden hvor den økologiske tilstanden er Svært dårlig (V). I to sub-bassenger avviker tilstanden fra tilstanden i deres respektive hovedbasseng: 1) Det delvis «isolerte» Steilenebassenget (St2) i Vestfjorden hvor forholdene er dårligere enn i Vestfjorden forøvrig, dvs. tilstandsklasse IV (Dårlig) og 2) den nordøstre del av Bekkelagsbassenget (RC5 og RC9) hvor tilstanden er i klasse II (God), dvs. bedre enn nærliggende stasjoner. Sistnevnte skyldes forbedringstiltak igangsatt med flytting av utløpsledningen fra Bekkelaget renseanlegg til dypere vann tidlig på 2000-tallet. I de indre deler av fjorden er det et stort avvik mellom dagens økologiske tilstand (Svært dårlig) og naturtilstanden (Svært god) som tidligere er beregnet basert på fossile foraminiferfaunaer i daterte sedimentkjerner. I ytre deler av Vestfjorden og utenfor Drøbaksterskelen samsvarer nåværende tilstand godt med naturtilstanden.

Det er generelt svært høyt organisk karbon (TOC)-innhold i overflatesedimentene i Indre Oslofjord, og innholdet korrelerer godt med både diversitetsindeksene og den sammensatte indeksen NQI. Unntaket er representert ved en stasjon i Bekkelagsbassenget (RC5), som ble kunstig tildekket med ren marin leire i 2007.

Korrelasjonen mellom foraminiferdata og målte oksygenkonsentrasjoner i bunnvannet er svært god. Faunassammensetningen (klyngeanalysen) for alle stasjonene peker klart i samme retning. Samlet gir dette en sterk indikasjon på at oksygen er en av de viktigste faktorene som styrer faunasammensetningen i Indre Oslofjord.

Prosjektets sluttrapport vil inneholde en utvidet diskusjon av resultatene samt resultater fra Del 2-undersøkelsene i prosjektet, som omhandler variabiliteten i foraminiferfaunaene innen enkeltstasjoner. Sluttrapporten vil ferdigstilles i begynnelsen av juni 2018.



1 FORMÅLET MED UNDERSØKELSEN

Målet med undersøkelsen er å samle inn informasjon om økologisk tilstand i forskjellige deler av Indre Oslofjord, og ut i fra dette si noe om levevilkår på sjøbunnen. Nyinnsamlede data sammenliknes med tidligere innsamlede data (tilgjengelige data fra 2009 og naturtilstanden, der dette finnes). Dette gir informasjon om utviklingstrenden i området.

Undersøkelsene baserer seg på bunnlevende foraminiferer (meiofauna) som raskt responderer på endringer i miljøet de lever i, spesielt oksygenforhold i bunnvannet og organisk belastning (eutrofiering). Fordelen med bruk av foraminiferer, fremfor andre økologiske kvalitetselementer, er at de etterlater sine tomme skall i sedimentet når de dør. Studier av disse skallene nedover i daterte sedimentkjerner gir informasjon om hvordan vannkvalitet og levevilkår har endret seg bakover i tid, helt tilbake til naturtilstanden (Alve m.fl. 2009, Dolven m.fl. 2013). Ut i fra sammenlikningen mellom nyinnsamlede versus eldre data er det mulig å vurdere effekter av tiltak, eksempelvis tildekkingen av forurensede sedimenter i Bekkelagsbassenget (Hess m.fl. 2014).

Det er velkjent at bløtbunnsfauna i enkelte tilfeller kan vise stor variabilitet («patchiness») innen et område. Dette er ikke undersøkt for foraminiferer i norske farvann. Det er viktig med kjennskap til variabiliteten i foraminiferfaunaene innen et område for å kunne samle inn et representativt antall replikater på hver stasjon. Dette må til for å få tilfredsstillende mengde data til å si noe om den økologiske tilstanden på hver stasjon. Studier av variabilitet inngår som Del 2 av denne undersøkelsen, og vil rapporteres i sluttrapporten som ferdigstilles i juni 2018.

2 MATERIALE OG METODER

2.1 Bruk av foraminiferer i overvåking

Foraminiferer er små (vanligvis <0,5 mm) bunnlevende, marine, encellede organismer med et skall av kalk eller sammenkittede korn (agglutinerte). Som en del av organismesamfunnet på bløtbunn, påvirkes foraminiferene av flere typer miljøbelastninger, spesielt organisk belastning og endringer i oksygenforholdene i bunnvannet. Individantall og artsmangfold endres med påvirkningsgrad og gir en god indikasjon på vannkvalitet og levevilkår på sjøbunnen. Foraminiferene reflekterer stedegne forhold på bunnen da de ikke kan bevege seg målrettet eller svømme bort. Organismegruppen er nyttig i miljørekonstruksjoner fordi den responderer raskt på miljøendringer. I tillegg blir skallene værende igjen i sedimentet når organismene dør, og fungerer som «spor» som kan brukes til å rekonstruere stedets økologiske tilstand. Foraminiferer har vist seg å rekolonisere et område i løpet av dager til år avhengig av lokale fysiske og geokjemiske forhold (Alve 1999) og er dermed et utmerket kvalitetselement til bruk i overvåking av endringer. Et godt eksempel er Bekkelagsbassenget hvor forurensede masser ble tildekket med rene masser. Foraminiferene rekoloniserte området etter kort tid (<1 år) og viste forbedring i økologisk status allerede etter 2 år (til sammenlikning med områder hvor forurensede masser ikke ble tildekket) (Hess et al., 2014). Foraminiferinnholdet nedover i en sedimentkjerne (= bakover i tid) kan brukes til å rekonstruere tidligere tiders økologisk tilstand og gi informasjon om «stedegen naturtilstand» (Fagrådets rapport 106 av Dolven og Alve 2010). Informasjon om naturtilstandens økologiske tilstand basert på foraminiferer (Alve m.fl. 2009a, b, Dolven og Alve 2010) benyttes allerede nå som veiledende informasjon for hva som er rimelige miljømål for ulike deler av Indre Oslofjord og i området rett utenfor Drøbakerskelen (Veileder 2:2013; NIVA 2011). Det er nylig utarbeidet et eget klassifiseringssystem for foraminiferer (Alve m.fl. submitted).



Tabell 1. Stasjoner for foraminiferanalyser i Indre Oslofjord i 2017. Stasjon nummer 1-7 og 8-11 representerer de to hovedbassengene, hhv Bunnefjorden og Vestfjorden. Stasjon 12 i Drøbaksundet er en referansestasjon. For noen stasjoner har vi resultater tilgjengelig fra 2009 (Hess upubl. data). * = Dolven og Alve (2010); Dolven m.fl. (2013). Bakgrunnsdata for St2 er basert på Dm2 lokalisert like ved i samme basseng.

Nr.	Stasjon	Området	Posisjon		Vann- dyp (m)	Tidligere data (levende foraminiferer):	Naturtilstanden basert på foraminiferer*:
1	Ep-1	Bunnefjorden	59.785633	10.721167	152	2009	ja
2	Cp 3-1	Bunnefjorden	59.835415	10.706800	100	2009	ja
3	Bunn 18x	Bunnefjorden	59.858345	10.696233	83	---	ja
4	Exp74	Bunnefjorden	59.870621	10.696380	74	2009	nei
5	RC 5	Bekkelags- bassenget	59.882210	10.746994	54	2009	nei
6	RC 9	Bekkelags- bassenget	59.88073	10.746785	49	2009	nei
7	Bo 2-1	Lysakerfjorden	59.890549	10.665517	55	2009	ja
8	Cj 3-1	Vestfjorden	59.844734	10.510067	58	2009	ja
9	Ck 3-1	Vestfjorden	59.828201	10.544367	87	---	nei
10	St2	Vestfjorden (Steilene- bassenget)	59.822094	10.592574	63	---	ja (Dm2)
11	Fl 1-1	Vestfjorden	59.756226	10.574152	164	---	ja
12	Im 4x	Drøbaksundet	59.644966	10.613640	157	2009	ja

2.2 Stasjoner for foraminiferundersøkelser i Indre Oslofjord, 2017

Undersøkelser av levende foraminiferfaunaer er gjennomført innen tilsvarende vanddypsintervall (ca 50-160 m) i de to hovedbassengene, Bunnefjorden og Vestfjorden (Tabell 1), i Indre Oslofjord for å dokumentere utviklingen av økologisk tilstand langs oksygengradienter.

Stasjonene i Bunnefjorden-Lysakerfjorden (nr. 1-7 i Tabell 1) omfatter vanddypp på 49-152 m og naturtilstanden basert på foraminiferer er allerede kjent fra fire av stasjonene (Dolven og Alve 2010). Stasjonene i Vestfjorden (nr. 8-11 i Tabell 1) omfatter vanddypp på 58-164 m og naturtilstanden basert på foraminiferer er kjent fra tre av stasjonene (Dolven og Alve 2010). I tillegg har vi undersøkt en stasjon utenfor Drøbakerskelen (nr. 12 i Tabell 1), hvor tidligere foraminiferundersøkelser har vist at både naturtilstanden og tilstanden i 2009 var «svært god» (Dolven m. fl. 2013, Hess upubl.

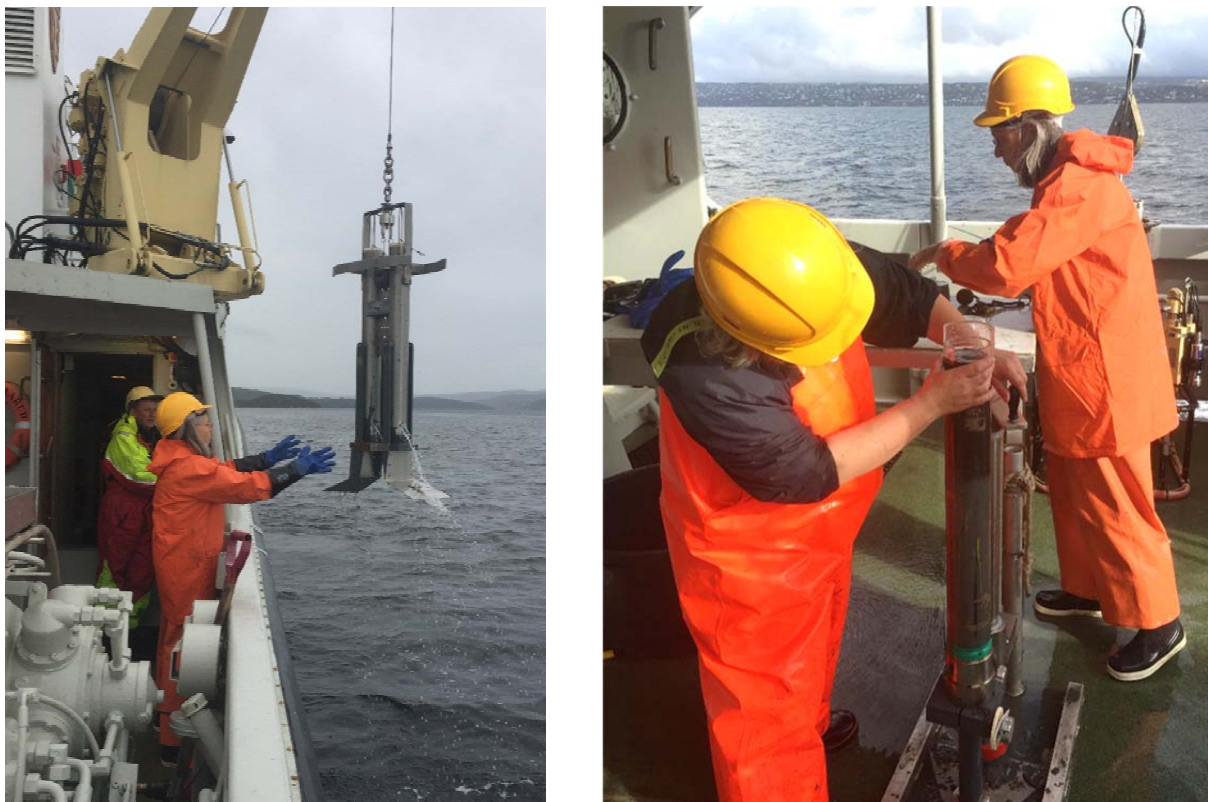
data). Denne stasjonen representerer en «referanse» for miljøtilstanden i Indre Oslofjord og 2017-undersøkelsene vil således gi bakgrunnsinformasjon for stabiliteten i Indre Oslofjordsystemet.

I senere år har vi, ved hjelp av foraminiferanalyser, fulgt utviklingen av miljøtilstanden i Bekkelagsbassenget. Målet har vært å teste vellykketheten av miljøtiltak på to stasjoner; tildekking av forurenset sjøbunn (RC5) og re-oksygenering av et anoksisk basseng (RC9; Hess m.fl. 2014, Kebede 2015). Restitueringen av miljøforholdene i dette bassenget pågår fremdeles og for å overvåke denne har vi også innhentet og analysert prøver fra de to stasjonene i Bekkelagsbassenget (stasjon nr. 5 og 6 i Tabell 1).

2.3 Prøveinnsamling og analyser

Prøveinnsamlingen fant sted med FF Trygve Braarud (UiO) i perioden 2-4 oktober 2017. Under bunnprøvetakingen ble det benyttet en Gemini-prøvetaker som innhentet to sedimentkjerner samtidig (Figur 1). Kjernene ble fotografert og beskrevet for uttak av prøver til analyse av levende foraminiferer, TOC, C/N og kornfordeling. Det ble prøvetatt minimum fire «skudd» på hver stasjon. Av de 8 innsamlede kjernene ble fire kjerner prøvetatt for foraminiferer, og overflatesedimentet (0-1 cm) fra tre kjerner ble prøvetatt og samlet i en blandprøve for analyse av støtteparametere (TOC, C/N og kornfordeling).

I tillegg ble det innsamlet hydrografiske data (temperatur, salinitet og oksygen) gjennom vannsøylen. Bunnvannsdata, relevante for bløtbunnsfaunaen, presenteres i inneværende rapport.



Figur 1. Prøvetaking med «Gemini-prøvetaker» i oktober 2017 (bildet til venstre). Kjernen fotograferes, beskrives og deles opp i sedimentskiver for analyse av foraminiferer, kornfordeling, TOC og C/N (bildet til høyre).



Levende (bengalrosafargede) foraminiferer i de øverste 0-1 cm ble preparert og analysert fra fire replikater i henhold til internasjonal standard (Schönfeld m.fl. 2012). Dette ble gjennomført med samme metodikk som tidligere innsamlede foraminiferprøver i Indre Oslofjord (Hess m. fl. 2014, Hess unpubl. data). Økologisk tilstand ble beregnet med diversitetsindekser ($H'_{\log 2}$ og ES_{100}) og en nylig utviklet interkalibrert NQI-indeks basert på foraminiferer (Alve m. fl. submitted).

Diversitetsindekser ($H_{\log 2}$ og ES_{100}) er beregnet for prøver med >100 individer, ved hjelp av Primer Ver. 6.1.6 (Clarke og Gorley 2006), og sammensatt indeks (NQI) er basert på Alve m. fl. (submitted).

Beregningene er basert på et gjennomsnitt av foraminiferdata fra fire replikater på hver stasjon. For hver indeksverdi er normalisert EQR (nEQR) beregnet iht. følgende formel (hentet fra Veileder 02/2013 revidert 2015) utarbeidet for makrofauna:

$$\text{nEQR} = (\text{indeksverdi} - \text{klassens nedre indeksverdi}) / (\text{klassens øvre indeksverdi} - \text{klassens nedre indeksverdi}) * 0,2 + \text{klassens nEQR basisverdi}$$

Samlet nEQR for stasjonen er kalkulert som et gjennomsnitt av de tre beregnede nEQR-verdiene (en for hver indeks).

Klyngeanalyser ble foretatt ved hjelp av Primer Ver. 6.1.6 (Clarke og Gorley 2006). Analysene er basert på telldata av alle replikatprøver hvor foraminiferer var til stede. Dataene ble 2-rot transformert for å dempe effekten av de mest hyppig forekommende artene og likhetsanalyse foretatt ved bruk av Bray-Curtis-metoden (Bray og Curtis 1957).

Analyser av total organisk karbon (TOC), total nitrogen (TN) og forenklet kornfordeling (<63 μm) ble gjennomført ved henholdsvis Institutt for biovitenskap (TOC og TN) og Institutt for geofag (kornfordeling), begge UiO. TOC og CN ble analysert ved hjelp av en Thermo Finnigan EA1112 ved ca. 1800 °C. Kornfordelingen ble foretatt ved at tørket, ubehandlet sediment ble våtsiktet gjennom en 63 μm sikt. TOC-verdiene er normalisert iht Veileder 02/2013 revidert 2015. Man må her være klar over at andelen av <63 μm i sedimentet til en viss grad styres av hvor grundig sedimentet har blitt vasket gjennom 63 μm -sikten.

Hydrografiske data ble innsamlet i forbindelse med kjerneprøvetakingen og ble utført med FF Trygve Braaruds Seabird CTD modell SBE 9plus.

Resultatene fra foraminiferundersøkelsene og støtteparametere (temperatur, salinitet, oksygen, TOC, kornfordeling og C/N) er sammenstilt under og kort diskutert mot tidligere innsamlede data i 2009 (Hess m. fl. 2014, Hess unpubl. data) og naturtilstanden (Dolven og Alve 2010, Dolven m.fl. 2013).

2.4 Klassifisering av økologisk tilstand basert på foraminiferer og støtteparametere

Tilstandsklasser basert på foraminiferer er vist i Tabell 2 og er hentet fra M633/2016 og Alve m.fl. (submitted). Tilstandsklasser for støtteparametere er vist i Tabell 3 (Veileder 02/2013 revidert 2015).



Tabell 2. Klassifiseringssystem for foraminiferer med tilstandsklasser for diversitetsindeksene ES_{100} og H'_{log_2} (M633/2016) og sammensatt indeks NQI (Alve m.fl. submitted). Fargekoder og klassegrenser for nEQR er iht Veileder 02/2013 revidert 2015.

Indeks	Tilstandsklasser				
	I	II	III	IV	V
	Svært god	God	Moderat	Dårlig	Svært dårlig
ES_{100}	35 - 18	18 - 13	13 - 10	10 - 9	9 - 0
$H'(\log_2)$	5 - 3,4	3,4 - 2,4	2,4 - 1,8	1,8 - 1,2	1,2 - 0
NQI	1 - 0,60	0,60 - 0,49	0,49 - 0,34	0,34 - 0,14	0,14 - 0
nEQR	1-0,8	0,8-0,6	0,6-0,4	0,4-0,2	0,2-0

Tabell 3. Tilstandsklasser for støtteparametere oksygen i bunnvann og normalisert total organisk karbon (TOC) etter Veileder 02/2013 revidert 2015.

Parameter	Tilstandsklasser				
	I	II	III	IV	V
	Svært god	God	Moderat	Dårlig	Svært dårlig
Oksygen (ml O ₂ /l)	>4,5	4,5-3,5	3,5-2,5	2,5-1,5	<1,5
Oksygen metning (%)	>65	65-50	50-35	35-20	<20
Normalisert TOC	0-20	20-27	27-34	34-41	41-200

3 RESULTATER

3.1 Økologisk tilstand basert på foraminifer-indeks

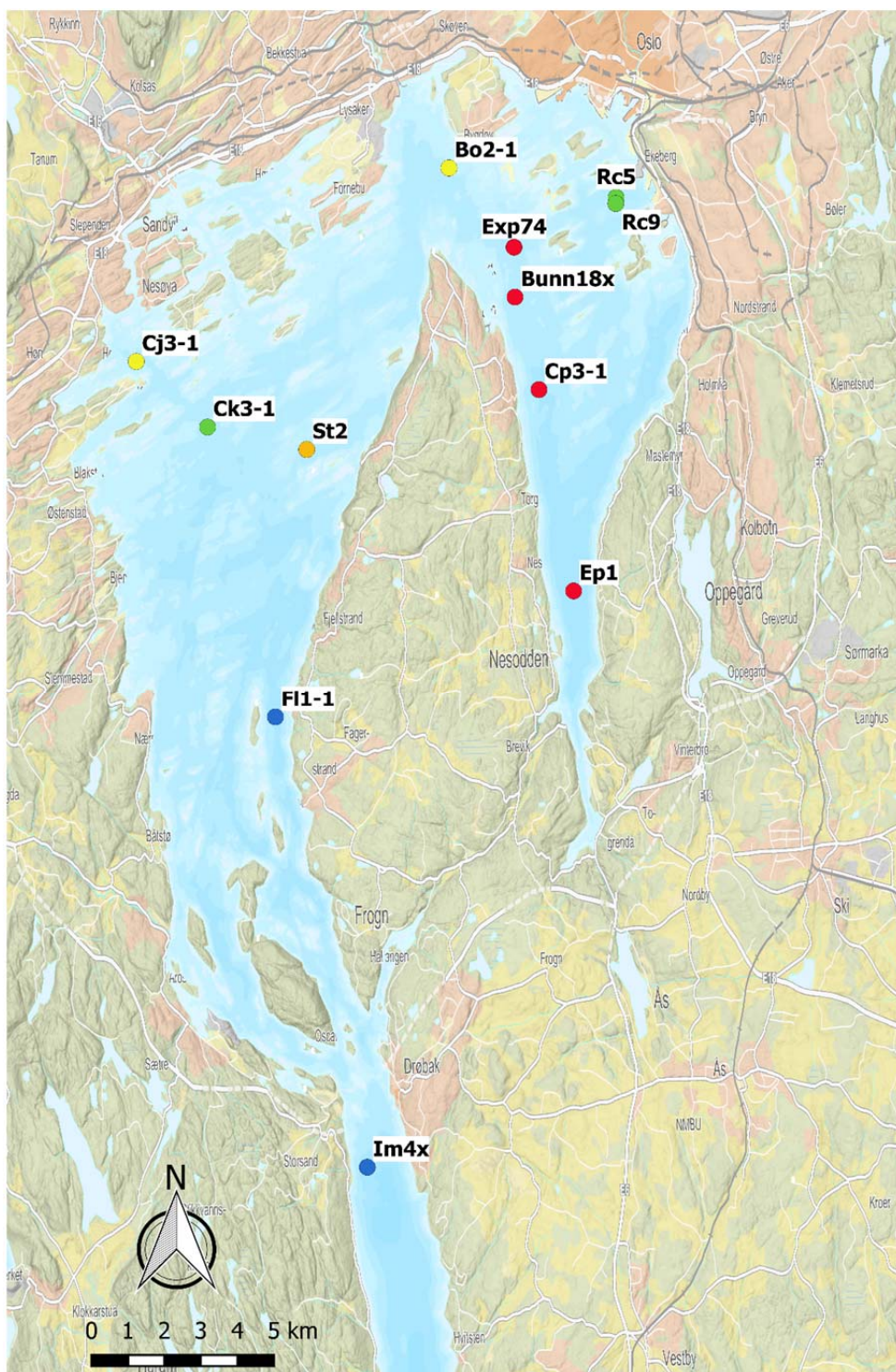
Beregnete tilstandsklasser for de to diversitetsindeksene (ES_{100} , H'_{log_2}) og den sammensatte NQI, er vist i Tabell 7. Samlet nEQR-verdi for hver stasjon er vist i Tabell 4 og i Figur 2.

Resultatene fra foraminiferundersøkelsene i Indre Oslofjord i oktober 2017 viser at den økologiske tilstanden i Bunnfjorden stort sett er i tilstandsklasse V (Svært dårlig). I Bekkelagsbassenget (RC5 og RC9) viser resultatene tilstandsklasse II (God). I Lysakerfjorden (Bo2-1) er tilstanden Moderat (tilstandsklasse III). I Vestfjorden varierer tilstanden fra Dårlig (IV) i Steilenebassenget (St2) til Svært god (I) på stasjon Fl1. Utenfor Drøbak viser resultatene Svært god tilstand (I) på stasjon Im4x.



Tabell 4. Beregnede indeksverdier (gjennomsnitt av fire replikater) og utregning av en samlet nEQR for hver 2017-stasjon. Stasjon Ep1 og Bunn18x hadde for få individer til beregning av indekser og reflekterer følgelig meget dårlige miljøforhold. For fargekoder og klassegrenser, se Tabell 2.

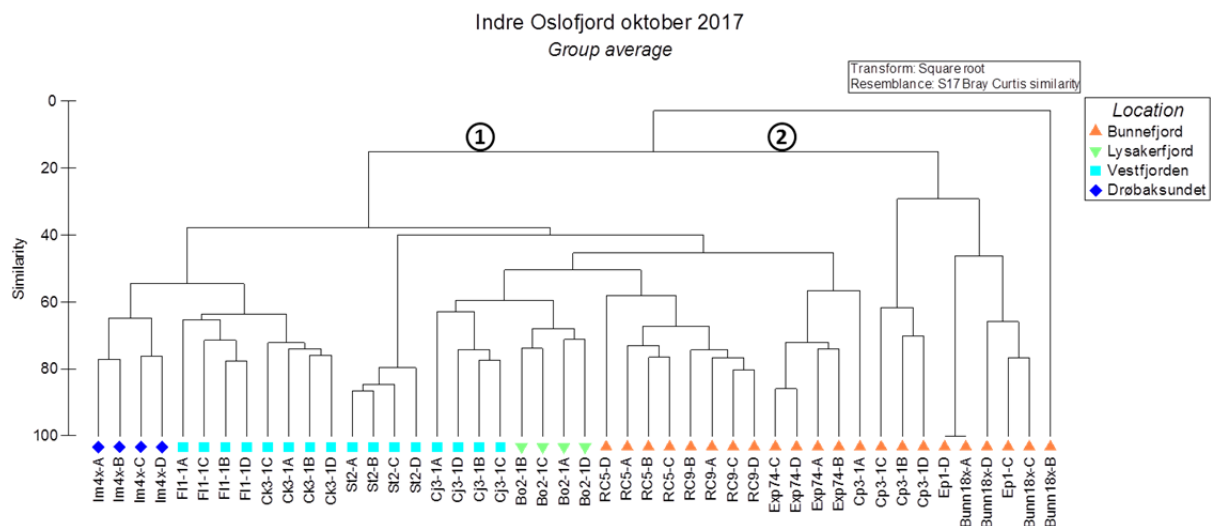
Stasjon	Området		ES ₁₀₀	H'(log ₂)	Foram-NQI	Samlet nEQR stasjon
Ep1	Bunnefjorden	snitt 4 replik	---	---	---	
	152m	nEQR				---
Cp3-1	Bunnefjorden	snitt 4 replik	5,06	0,99	0,19	
	100m	nEQR	0,11	0,16	0,25	0,176
Bunn18x	Bunnefjorden	snitt 4 replik	---	---	---	
	83m	nEQR				---
Exp74	Bunnefjorden	snitt 4 replik	5,70	0,70	0,17	
	74m	nEQR	0,13	0,12	0,23	0,158
RC5	Bekkelagetsbas	snitt 4 replik	15,63	2,61	0,39	
	54m	nEQR	0,71	0,64	0,47	0,604
RC9	Bekkelagetsbas	snitt 4 replik	14,91	2,96	0,39	
	49m	nEQR	0,68	0,71	0,46	0,616
Bo2-1	Lysakerfjorden	snitt 4 replik	12,86	2,38	0,33	
	55m	nEQR	0,59	0,59	0,39	0,525
Cj3-1	Vestfjorden	snitt 4 replik	14,40	2,52	0,33	
	58m	nEQR	0,66	0,62	0,39	0,557
Ck3-1	Vestfjorden	snitt 4 replik	18,59	3,42	0,47	
	87m	nEQR	0,81	0,80	0,57	0,726
St2	Vestfjorden	snitt 4 replik	7,14	1,55	0,24	
	63m	nEQR	0,16	0,32	0,30	0,257
Fl1-1	Vestfjorden	snitt 4 replik	21,61	3,80	0,57	
	164m	nEQR	0,84	0,85	0,74	0,812
Im4x	Drøbaksundet	snitt 4 replik	25,67	4,28	0,65	
	157m	nEQR	0,89	0,91	0,82	0,874



Figur 2. Økologisk tilstand i utvalgte områder av Indre Oslofjord basert på foraminiferundersøkelser i oktober 2017. Foraminiferdataene er basert på gjennomsnittsverdier for levende faunaer i fire replikater per stasjon. For fargekoder, se Tabell 2.

3.2 Klyngeanalyser

Klyngeanalysene definerte to hovedgrupper av foraminiferfaunaer med en systematisk endring i faunasammensetningen fra utenfor Drøbakerskelen, via Vestfjorden innover til de dypeste deler av Bunnefjorden (fra venstre til høyre i Figur 3). Den ene hovedgruppen (gruppe 1 i Figur 3) er delt i to subgrupper hvorav den ene består av faunaene utenfor Drøbakerskelen og i de sydlige, dypere deler (87-164 m) av Vestfjorden. Den andre subgruppen består av de grunnere faunaene på 49-74 m vandndyp i Vestfjorden, Lysakerfjorden og i de nordlige deler av Bunnefjorden. Den andre hovedgruppen (gruppe 2 i Figur 3) er representert ved de individ- og artsfattige faunaene (Tabell 4) på større enn 80 m vandndyp i Bunnefjorden. For de aller fleste stasjonene er det en høy grad av likhet mellom alle replikatene. Unntaket er de tre dype, individfattige stasjonene (Bunn18x, Cp3-1, Ep1) på større enn 80 m vandndyp i Bunnefjorden.



Figur 3. Klyngeanalyse med tydelig gruppering av de levende foraminiferfaunaene langs et profil fra området utenfor Drøbakerskelen (venstre del av figuren) via de dype, sørlige deler av Vestfjorden og de grunnere deler av Vestfjorden/Lysakerfjorden/Bunnefjorden (hovedgruppe 1) til de dypere deler av Bunnefjorden (høyre del; hovedgruppe 2).

3.3 Totalt organisk karbon og C/N-forhold

De fleste undersøkte stasjoner i 2017 viser svært høyt innhold av total organisk karbon i sedimentene (tilstandsklasse V) (Tabell 5). Det ene unntaket er stasjon RC5 som ble tildekket av ren postglasial marin leire i 2007 som del av en tiltaksrettet opprydding av forurenset sediment i Bekkelagsbassenget. Det andre unntaket er stasjonen utenfor Drøbakerskelen (referansestasjonen Im4x). C/N-verdiene er relativt stabile innen undersøkelsesområdet (9,2 - 12,8).

Tabell 5. Total organisk karbon (TOC) og C/N-verdier fra prøver innhentet i 2017. For noen av stasjonene er det også vist kornfordeling og TOC-verdier fra 2009 (*=Rygg, pers. kom.) og naturtilstanden (Dolven og Alve 2010). TS = tørt sediment. Fargekodene er iht Veileder 02/2013 revidert 2015.

Stasjon	2017				2009*			Naturtilstand (eldre enn 1900)		
	<63µm (%)	TOC % TS	C/N (average)	Normalisert TOC mg/g	<63µm (%)	TOC % TS	Normalisert TOC mg/g	<63µm (%)	TOC % TS	Normalisert TOC mg/g
Ep1	73	4,6	10,1	51,0	62	2,8	34,4	92	1,4	15,9
Cp3-1	84	7,8	9,2	80,8	40	3,2	42,3	94	1,3	14,4
Bunn 18x	69	6,1	9,9	67,0	nd	3,1	nd	94	1,6	17,2
Exp 74	56	5,6	10,8	64,2	nd		nd	nd	nd	nd
RC-5	94	1,4	9,8	14,8	76	1,5	19,3	nd	1,5	nd
RC-9	48	4,6	12,8	55,7	60	3,1	38,2	nd	1,5	nd
Bo2-1	62	4,9	11,3	55,9	50	3,6	44,7	87	1,5	17,7
Cj3-1	77	4,6	10,8	49,8	59	3,0	37,1	94	1,9	19,8
Ck3-1	74	3,8	10,7	43,0	78	2,8	32,1	nd	nd	nd
St2	78	5,2	10,5	55,4	nd		nd	92	1,6	17,3
Fl1	86	4,3	10,6	45,8	81	3,3	36,2	80	1,7	20,9
lm 4x	75	3,5	10,9	39,0	nd	2,2	nd	76	1,6	20,5

3.4 Hydrografiske data

På innsamlingstidspunktet, var temperaturen i bunnvannet i underkant av 8 °C i hele undersøkelsesområdet. Den var imidlertid svakt høyere på stasjonene i Bunnefjorden (7,6 - 8,0 °C) enn i Vestfjorden og ut over Drøbakterskelen (7,3 – 7,5 °C) (Tabell 6).

Salinitetsverdiene varierer mellom 31,0 og 34,7 i bunnvannet innen undersøkelsesområdet. De laveste verdiene er observert på de to grunneste målestasjonene dvs i Bekkelagsbassenget (RC5 og RC9). Verdiene er noe høyere (32,2 – 32,9) i Vestfjorden, og på større enn 73 m i Bunnefjorden (33,1 – 33,3). Den høyeste verdien på 34,7 ble målt utenfor Drøbakterskelen på 168 m.

Oksygenforholdene i bunnvannet i oktober 2017 spenner over alle tilstandsklasser fra Svært dårlig på større enn 70 m vanddyb i Bunnefjorden og på St2 i Steilenebassenget (Vestfjorden), via Dårlig på i Bekkelagsbassenget (RC5 og RC9) og NV deler av Vestfjorden (Cj3-1, Ck3-1) til hhv Moderat i dypere, sydlige deler av Vestfjorden (Fl1) og Svært god utenfor Drøbakterskelen (Tabell 6).

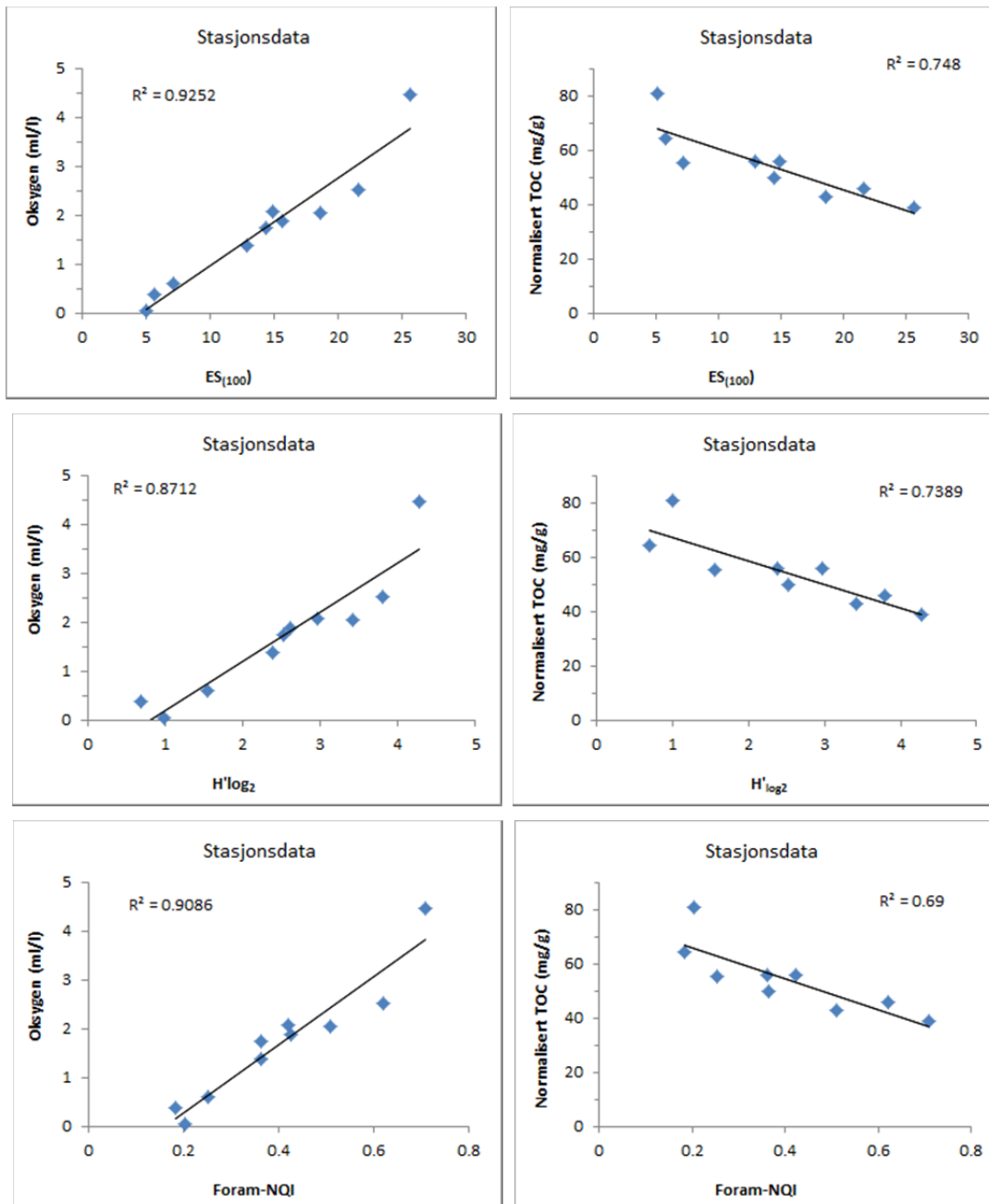


Tabell 6. Hydrografiske data (temperatur, salinitet og oksygen) fra bunnvannet på undersøkte stasjoner i 2017. Oksygendata i bunnvann fra 2009 er også vist (data fra NIVA og UiO). Fargekodene er iht. Veileder 02/2013 revidert 2015.

Stasjon	2017						2009
	Undersøkte vanddyb	Temperatur	Salinitet	Oksygen			Oksygen
				%	mg/l	ml/l	
Ep1	150	7,8	33,2	0,5	0,1	0,04	0
Cp3-1	99	7,8	33,2	0,7	0,1	0,05	nd
Bunn18x	83	7,9	33,2	0,5	0,0	0,03	nd
Exp74	73	8,0	33,1	5,8	0,6	0,39	1,03
RC5	54	7,6	31,5	27,5	2,7	1,89	3,09
RC9	50	7,8	31,0	30,3	2,9	2,08	2,82
Bo2-1	53	7,8	32,5	20,6	2,0	1,40	4,15
Cj3-1	57	7,5	32,2	25,4	2,5	1,74	nd
Ck3-1	86	7,4	32,3	30,0	2,9	2,06	4,98
St2	64	7,7	32,9	8,8	0,8	0,59	nd
Fl1	164	7,3	32,4	36,9	3,6	2,53	5,3
lm4x	168	7,4	34,7	66,3	6,3	4,47	5,58

3.5 Korrelasjon mellom faunaindeksere og miljøparametere

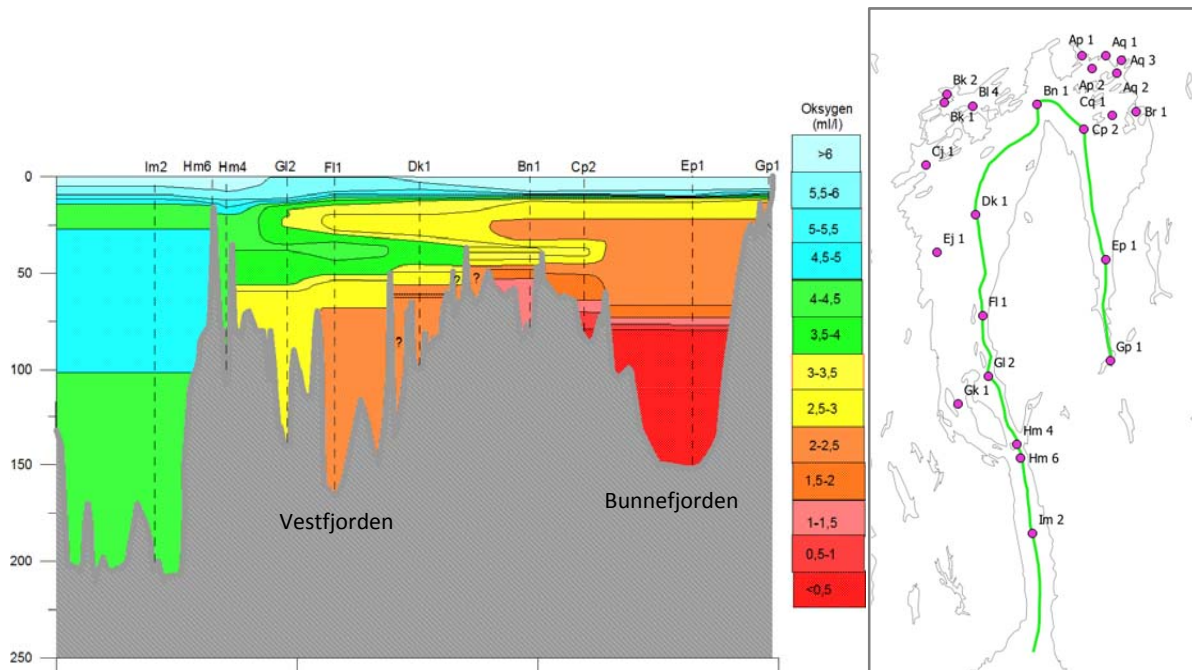
Innen undersøkelsesområdet viser både diversitetsindeksene (ES_{100} og H') og den sammensatte indeksen NQI meget god positiv korrelasjon med konsentrasjonen av løst oksygen i bunnvannet på innsamlingstidspunktet (Figur 4). Korrelasjonen mellom indeksene og normalisert TOC er også gode, men noe svakere enn for oksygen. Faunaindeksene på to av stasjonene på større enn 80 m vanddyb i Bunnefjorden (Ep1, Bunn18x; Tabell 4) kunne ikke beregnes pga for lavt individantall (< 100). I tillegg er TOC-data for stasjon RC5 utelatt da verdien er påvirket av det postglasiale leirlaget som ble spredt i deler av Bekkelagsbassenget som tildekkingsmasser i 2007.



Figur 4. Korrelasjon mellom oksygenkonsentrasjonen (ml/l) i bunnvannet (venstre) og normalisert TOC (mg/g) i sedimenter (0-1 cm) (høyre) på innsamlingsstidspunktet (oktober 2017) og hver av tre beregnede indekser (ES₁₀₀, H' og NQI) basert på bentiske foraminiferer. Faunadataene representerer gjennomsnitt av fire replikater fra hver av åtte stasjoner i Indre Oslofjord og en stasjon rett utenfor Drøbakerskelen.

4 DISKUSJON

De innsamlede oksygendataene fra oktober 2017 stemmer overens med målinger foretatt av Norconsult ca 2 uker senere (Figur 5). For de dypere deler av Bunnefjorden, gjenspeiler de Svært dårlige oksygenforholdene fortsettelsen av en stagnasjonsperiode med manglende dypvannsutskifting som har vart siden 2014 (Norconsult 2017). Foraminiferindeksene på større enn 70 m vanddyb i Bunnefjorden avspeiler disse forholdene (Tabell 7).



Figur 5. Oksygenforholdene (ml/l) gjennom Indre Oslofjord og ut i Drøbaksundet i oktober 2017 (figurer hentet fra Norconsult 2017). Farger etter tilstandsklasser for oksygen i dypvannet (Veileder 02/2013).

Foraminiferindeksene avspeiler betydelig bedre økologisk tilstand i Vestfjorden enn i Bunnefjorden (Tabell 4, Figur 2). Det eneste unntaket er Steilenebassenget (St2) hvor ES_{100} tilsvarer Svært dårlig tilstand. Basert på de normaliserte TOC-verdiene (Tabell 5) er det rimelig å anta at tilførselen av organisk materiale til Steilenebassenget er på samme nivå som de øvrige stasjonene i Vestfjorden. Årsaken til den dårlige tilstanden er sannsynligvis begrenset dypvannsutskifting i dette bassenget som er delvis avsnørt fra Vestfjorden for øvrig. Denne antakelsen er støttet av undersøkelser foretatt av studenter ved Institutt for geofag, Universitetet i Oslo, høsten 2016.

I det store og hele indikerer den meget gode korrelasjonen mellom foraminiferindeksene og oksygenkonsentrasjonene, samt klyngeanalysen (Figur 3), at faunaen avspeiler oksygenforholdene i bunnvannet (Figur 4). Nylig avsluttede interkalibreringer mellom makrofauna og bentske foraminiferer viser signifikante korrelasjoner for de tre faunaindeksene benyttet i den foreliggende undersøkelsen (Alve m. fl. submitted). Det bør således være belegg for å påstå at foraminiferresultatene presentert her reflekterer levevilkårene langs bunnen av Indre Oslofjord og ut over Drøbakerskelen svært godt.

En sammenlikning av indeksresultatene fra 2017 med resultatene fra 2009 (basert på levende foraminiferer, Hess unpubl. data) viser mange likhetstrekk. På tross av at både normaliserte og ikke-

normaliserte TOC-verdier viser en klar økning i overflatesedimentene fra 2009 til 2017 (Tabell 5), er forskjellene i indeksverdiene stort sett for små til at man kan trekke sikre konklusjoner. I det tidligere anoksiske Bekkelagsbassenget er det imidlertid en klar forbedring i tilstandsklasse på RC9. Dette indikerer at den positive utviklingen observert i perioden 2008-2010 (Hess m. fl. 2014), som ble initiert i forbindelse med flytting av utløpsledningen fra Bekkelaget renseanlegg i 2001 (Berge m. fl. 2011), fremdeles fortsetter.

I Lysakerfjorden (Bo2-1) og Vestfjorden (Cj3-1) er det en generell nedgang i indeksverdier og tilstandsklasser fra 2009 til 2017. Utenfor Drøbaksterskelen er den økologiske tilstanden vedvarende Svært god.

Sammenliknet med naturtilstanden som ble beregnet basert på fossile foraminiferfaunaer i daterte sedimentkjerner i Indre Oslofjord (Dolven og Alve 2010) er det spesielt i Bunnefjorden et stort avvik mellom dagens økologiske tilstand (Svært dårlig) og naturtilstanden (Svært god). I ytre deler av Vestfjorden og utenfor Drøbaksterskelen samsvarer nåværende tilstand svært godt med naturtilstanden (Tabell 7).

Tabell 7. Tilstandsklasser for ES_{100} , H' og NQI . * = basert på 0-2 cm og 3 replikater; mens RC data er fra 0-1 cm (Hess upubl. data). Stasjon Ep1 og Bunn18x samt Cp3-1 i 2009, hadde for få individer til beregning av indekser og reflekterer følgelig meget dårlige miljøforhold. ** = Dolven m.fl. (2013). For fargekoder og klassegrenser, se Tabell 2.

Stasjon	Benevnelse	Vanndyp (m)	2017					2009*					Naturtilstand basert på foraminifera**		
			Total # arter	Gj.sn indiv./cm ²	Gj.sn ES_{100}	Gj.sn $H'(\log_2)$	Gj.sn Foram-NQI	Total # arter	Gj.sn indiv./cm ²	Gj.sn ES_{100}	Gj.sn $H'(\log_2)$	Gj.sn Foram-NQI	ES_{100}	$H'(\log_2)$	Alder (år)
Ep1	Bunnefjord	152	1	< 1	---	---	---	1	8	---	---	---	24,9	4,0	før 1900
Cp3-1	Bunnefjord	100	12	20	5,06	0,99	0,19	5	3	---	---	---	23,4	3,8	før 1900
Bunn18x	Bunnefjord	83	2	1	---	---	---						19,4	3,2	før 1900
Exp74	Bunnefjord	74	20	64	5,70	0,70	0,17	7	2	---	---	---			
RC5	Bekkelaget	54	36	50	15,63	2,61	0,39	27	24	14,0	3,1	0,37			
RC9	Bekkelaget	49	29	52	14,91	2,96	0,39	18	14	9,2	2,1	0,28			
Bo2-1	Lysakerfjord	55	30	46	12,86	2,38	0,33	24	20	16,0	3,4	0,56	18,4	3,2	før 1900
Cj3-1	Vestfjord	58	36	90	14,40	2,52	0,33	31	21	16,2	3,1	0,50	27,2	4,1	før 1900
Ck3-1	Vestfjord	87	53	71	18,59	3,42	0,47								
St2	Vestfjord	63	24	425	7,14	1,55	0,24								
Fl1-1	Vestfjord	164	50	58	21,61	3,80	0,57						30,5	4,4	før 1900
Im4x	Drøbaksunde	157	58	104	25,67	4,28	0,65	42	108	23,08	3,96	0,67	28,5	4,4	~ 1930

5 KONKLUSJON

Konklusjonene bygger på 1) resultater fra analyser av levende foraminiferfaunaer, kornfordeling, total organisk karbon og C/N-forhold i bunnsedimenter samt hydrografiske data (temperatur, salinitet og oksygen) samlet inn på 12 stasjoner i Indre Oslofjord og rett utenfor Drøbaksterskelen i oktober 2017 og 2) sammenlikning av 2017-resultatene med tilsvarende undersøkelser fra 2009 og informasjon om naturtilstanden som tidligere er beregnet basert på fossile foraminiferfaunaer i daterte sedimentkjerner fra syv av stasjonene.

- I to sub-bassenger avviker den økologiske tilstanden fra tilstanden i deres respektive hovedbasseng. Det gjelder Steilenebassenget (St2) i Vestfjorden med Dårlig tilstandsklasse



(IV) og Bekkelagsbassenget (RC5 og RC9) nordøst i Bunnefjorden med God tilstandsklasse (II). Sistnevnte skyldes miljøforbedringstiltak igangsatt tidlig på 2000-tallet.

- Det er en svært god korrelasjon mellom de målte oksygenkonsentrasjonene i bunnvannet og både diversitetsindeksene og den sammensatte indeksen, NQI. Korrelasjonen mellom indeksene og normalisert TOC er også gode, men noe svakere enn for oksygen. En klyngeanalyse som beskriver likheter i faunassammensetningen mellom alle stasjonene peker klart i samme retning. Samlet gir dette en sterk indikasjon på at oksygen er en av de viktigste faktorene som styrer både de struktur- og samfunnsmessige egenskapene ved foraminiferfaunene i Indre Oslofjord. De kan følgelig bidra med viktig informasjon om levevilkårene på fjordbunnen slik forholdene er i dag (levende faunaer) og slik de var i tidligere tider (fossile faunaer).
- Sammenlikninger med tilsvarende data fra åtte av stasjonene i 2009 viser liten endring i de levende foraminiferfaunaene. Sammenliknet med naturtilstanden, som stort sett viser Svært god tilstand på de syv stasjonene hvor dette tidligere er beregnet (basert på fossile foraminiferfaunaer), er avviket betydelig for Bunnefjorden og noe mindre for de nordlige deler av Vestfjorden. I sydlige deler av Vestfjorden og utenfor Drøbaksterskelen samsvarer nåværende tilstand svært godt med naturtilstanden.
- Resultatene indikerer at den negative utviklingen i levevilkårene på bunnen er knyttet til økt tilførsel av organisk materiale til Indre Oslofjord fra naturtilstanden og frem til i dag.

6 REFERANSER

Alve, E., Hess, S., Bouchet, V.M.P., Dolven, J.K., Rygg, B. Intercalibrating biotic indices based on benthic foraminifera and macro invertebrates: a case study from the Skagerrak (S Norway). Submitted Ecological Indicators.

Alve, E., Helland, A. Magnusson, J., 2009a. Bærumsbassenget et naturlig anoksisk basseng? NIVA-report 5735-2009, 30 sider.

Alve, E., Lepland, A., Magnusson, J., Backer-Owe, K., 2009b. Monitoring strategies for re-establishment of ecological reference conditions: possibilities and limitations. Marine Pollution Bulletin 59, 297–310.

Berge, J.A., Amundsen, R., Bjerkeng, B., Borgersen, G., Bjerknes, E., Gitmark, J.K., Gjøsæter, J., Grung, M., Gundersen, H., Holth, T.F., Hylland, K., Johnsen, T., Knutsen, H., Ledang, A.B., Lømsland, E.R., Magnusson, J., Nerland, I.L., Olsen, E.M., Paulsen, Ø., Rohlack, T., Sørensen, K., Walday, M., 2011. Overvåking av forurensningssituasjonen i Indre Oslofjord 2010. Rapport/Report 6181-2011, Norsk institutt for vannforskning (NIVA), Oslo.

Bray, J.R., Curtis, J.T., 1957. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. Ecological Monographs 27: 325–349.

Clarke, K.R., Gorley, R.N., 2006. Primer v6: User manual/tutorial. Primer-E Ltd, Plymouth.

Dolven, J.K., Alve, E., 2010. Naturtilstanden i Indre Oslofjord. Fagrådet for vann- og avløpsteknisk samarbeid i Indre Oslofjord. Rapport no. 106. ISBN 978-82-91885-39-1. 86 sider.



Dolven, J.K., Alve, E., Rygg, B., Magnusson, J., 2013. Defining past ecological status and in situ reference conditions using benthic foraminifera: A case study from the Oslofjord, Norway. *Ecological Indicators* 29, 219-233.

Hess, S., Alve, E., Reuss, N., 2014. Benthic foraminiferal recovery in the Oslofjord (Norway): Responses to capping and re-oxygenation. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences* 147, 87-102.

Kebede, S.G., 2015. Capping of contaminated sediments in a formerly anoxic basin in Inner Oslofjord, Norway: Temporal processes and ecological effects. MSc thesis in Geosciences, University of Oslo, 60 sider.

M-633/ 2016; Pedersen, A., Alve, E., Alvestad, T., Borgersen, G., Dolven, J.K, Gundersen, Hess, S., Kutti, T., Rygg, B., Velvin, R. og Vedal, J.: Bløtbunnsfauna som indikator for miljøtilstand i kystvann. Ekspertvurderinger og forslag til nye klassegrenser og metodikk. 59 sider.

Norconsult, 2017. Toktrapport for oktober 2017: <http://www.indre-oslofjord.no/uploads/Toktrapport5-17.10.2017.pdf>

Schönfeld, J., Alve, E., Geslin, E. Korsun, S., Jorissen. F., Spezzaferri, S., and members of the FOBIMO group, 2012. The FOBIMO (FOraminiferal Blo-MOnitoring) initiative - Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies. *Marine Micropaleontology* 94-95, 1-13.

Veileder 02:2013 revidert 2015. Klassifisering av miljøtilstand i vann - Økologisk og kjemisk klassifiseringssystem for kystvann, grunnvann, innsjøer og elver. 263 sider.