



FFI-RAPPORT

17/00323

Klassifisering av havbunnen i prioriterte områder langs norskekysten (CD&E 1446)

—
Ellen Johanne Eidem

Klassifisering av havbunnen i prioriterte områder langs norskekysten (CD&E 1446)

Ellen Johanne Eidem

Emneord

Undervannsakustikk
Havbunnsedimenter
Batymetri
Ekkolodd
Tokt

FFI-rapport

FFI-RAPPORT 17/00323

Prosjektnummer

1348

ISBN

P: 978-82-464-2942-7

E: 978-82-464-2943-4

Godkjent av

Torgeir Svolsbru, *forskningsleder*

Elling Tveit, *avdelingssjef Maritime systemer*

Sammendrag

Gjennom FFIs omfattende dybdekartlegginger med multistråle-ekkolodd langs kysten av Norge og i Barentshavet med forskningsfartøyet M/S H.U. Sverdrup II samles samtidig inn refleksivitet fra havbunnen ("ekkostyrke"). Ved å bruke kommersiell programvare kan disse dataene benyttes til å lage bunnkart over blant annet kornstørrelse og sedimenttype. I slike verktøy ligger allerede a-priori antagelser om forholdet mellom refleksivitet og ulike sedimentegenskaper. For å verifisere resultatene er det en fordel å sammenligne med prøver av havbunnen.

Ved bruk av sonarprediksjonsverktøyet Lybin i geografiske områder der det i dag er lite informasjon om havbunnens beskaffenhet, benyttes ofte standard Lybin bunnmodell. I et tidligere arbeid studerte vi modeller for akustisk tilbakespredningsstyrke og refleksjonstap fra havbunnen som et supplement til standard Lybin bunnmodell. Data fra eksperimentelle målinger i nordlige Nordsjøen ble sammenlignet med prediksjoner av gjenklang og transmisjonstap. Vi foreslo nye bunnmodeller som baserer seg på kun én parameter til å beskrive havbunnen, nemlig kornstørrelse. Det langsiktige målet er å kunne utnytte kart over estimert kornstørrelse i enkle havbunnmodeller i Lybin.

Denne rapporten tar for seg sedimentklassifikasjon i tre områder i Nordsjøen, i Oslofjorden og på Trøndelagskysten (totalt 36 000 km²). Det er produsert kart over bunnrefleksivitet og estimert kornstørrelse, og korrelasjon mellom kartstørrelser og forskjellige sedimentparametre er undersøkt. I studien inngår 64 sedimentkjerner (6–11 cm tykke og opptil 2.6 m lange sylindriske prøver av havbunnen), 151 grabbprøver og 217 sedimentprøver fra 215 lokaliteter. Pearsons korrelasjonskoeffisient er høy ($r = 0.68$) mellom estimert og målt mediankornstørrelse; estimert kornstørrelse er generelt grovere enn målt. Behovet for standardiserte samplingsmetoder er påtagelig når det tas utsnitt av grabbprøver der overflatelaget skiller seg fra sedimentlaget under.

Akustiske målinger av sedimentkjernene viser vesentlig lavere lydshastighet som funksjon av tetthet enn det som er funnet i litteraturen, og forskjellen bør undersøkes nærmere. Korrelasjonen mellom fysiske parametre (andel sand og grus, mediankornstørrelse) og geoakustiske parametre (lydshastighet, tetthet) midlet over hele kjernelengder, varierer med havområde. Dårligst korrelasjon er det på Trøndelagskysten. Korrelasjonen øker når kun data fra de øverste 20 cm inkluderes i analysen. Korrelasjonen mellom bunnrefleksivitet og geoakustiske parametre varierer også med havområde, fra ingen eller svak korrelasjon på Trøndelagskysten til sterk korrelasjon i Oslofjorden. Korrelasjonen mellom estimert kornstørrelse og tetthet er sterk både på Trøndelagskysten og i Oslofjorden.

Denne rapporten er en del av CD&E-aktiviteten EP 1446 Bunntyper Lybin.

Summary

Through the extensive depth surveying using multibeam echo sounders from the research vessel M/S H.U. Sverdrup II off the coast of Norway and in the Barents Sea, FFI also collects bottom reflectivity (the ratio of backscattered to incoming intensity). With commercial software these data may be used to produce bottom maps of for instance estimated sediment type and grain size. Such tools rely on a-priori assumptions about the relationship between reflectivity and sediment features. For verification of the results it is beneficial to compare with seabed sediment samples.

Using the sonar performance tool Lybin in geographical areas where information about the seabed texture is lacking, the standard Lybin bottom model is often selected. In an earlier work we studied acoustic models of bottom backscattering strength and reflection loss, as a supplement to the standard bottom model. Experimental data from the northern North Sea was compared with predictions of reverberation and transmission loss based on the standard and alternative bottom models. We suggested new bottom models which depend only on one parameter to describe the seabed, namely the grain size. The long term goal is to produce estimated grain size maps which can be input to simple models of the seabed in Lybin.

In this report we focus on sediment classification in three regions in the Oslo fiord, in the North Sea and off the coast of Trøndelag (in total 36 000 km²). Maps of bottom reflectivity and estimated grain size are produced, and correlation between the map parameters and different sediment features are investigated. Analysis results from 64 sediment cores (6–11 cm thick and up to 2.6 m long cylindrical samples of the seabed), 151 grab samples and 217 sediment sub samples from 215 locations are interpreted. Pearson's correlation coefficient is high ($r = 0.68$) between estimated and measured median grain size; estimated grain size is usually coarser than measured. The need of standardized sampling methods is notable when sub sampling the grab samples where the top surface texture deviates from the underlying sediment layer.

Acoustic measurements of the sediment cores show much lower sound speed as function of density than found in the literature, and the difference needs to be investigated further. The correlation between physical parameters (fraction of sand and gravel, median grain size) and geo-acoustic parameters (sound speed, density) averaged over full-length cores, vary with the region. Lowest correlation is obtained off coast of Trøndelag. The correlation increases when the data from only the upper 20 cm is included in the analysis. The correlation between bottom reflectivity and geo-acoustic parameters varies with the region, from absent to weak off the coast of Trøndelag to strong in the Oslo fiord. The correlation between estimated grain size and density is strong both off the coast of Trøndelag and in the Oslo fiord.

This report is part of the CD&E activity EP 1446 Bottom types Lybin.

Innhold

Sammendrag	3
Summary	4
Forord	9
1 Innledning	11
2 Materiale og metoder	12
2.1 Geografi	12
2.2 Akustiske data	12
2.2.1 Bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse	14
2.2.2 Produksjonen av bunnkart	14
2.3 Prøvetaking av havbunnen	15
2.3.1 Målinger av lyd hastighet og tetthet i sedimentkjerner	18
2.3.1.1 <i>Korreksjon til referansetemperatur og trykk</i>	19
2.3.1.2 <i>Kvalitetssikring av lyd hastighetsmålinger</i>	20
2.3.2 Kornfordelingsanalyse på sedimentprøver	21
2.3.2.1 <i>Kornstørrelse og sedimenttyper</i>	22
2.3.2.2 <i>Klassifikasjon</i>	25
2.3.2.3 <i>Lyd hastighet, tetthet og kornstørrelse</i>	26
2.3.3 Kvalitativ analyse av grabbprøver	28
2.4 Posisjonering og vanddyb	28
2.5 Statistiske analyser	29
3 Batymetri og sedimentprøver	31
4 Bunnkart	32
5 Korrelasjoner mellom fysiske og akustiske parametre	40
5.1 Fysiske parametre	41
5.2 Akustiske parametre for prøvestasjoner i Oslofjorden og på Trøndelagskysten	43
5.3 Fysiske og akustiske parametre	44
5.4 Analyse av datapunkter som tidligere er flagget ut	47
5.4.1 Estimert kornstørrelse lik -1ϕ	48

5.4.1.1	Beskrivelse av prøver med målt kornstørrelse $< 5\phi$ og estimert kornstørrelse lik -1ϕ	49
5.4.1.2	Beskrivelse av prøver med målt kornstørrelse $> 5\phi$ og estimert kornstørrelse lik -1ϕ	50
5.4.1.3	Prøver der kornstørrelse ikke ble målt – fra stasjoner med est. kornstørrelse lik -1ϕ	51
5.4.2	Estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$	51
5.4.2.1	Prøver fra stasjoner med bunnreflektivitet > -30 dB og estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$	51
5.4.2.2	Prøver fra stasjoner med bunnreflektivitet < -30 dB og estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$	53
5.4.2.3	Prøver der kornstørrelse ikke ble målt – fra stasjoner med est. kornstørrelse $> 8.8\phi$	53
5.4.3	Stasjon G35/13 fra Trøndelagskysten	54
5.4.4	Stasjoner i Nordsjøen	55
5.4.5	Bimodale sedimentprøver	55
5.4.6	Høyt standardavvik i bunnreflektivitet	55
5.5	Analyse av grabbprøver fra Oslofjorden og Trøndelagskysten med estimert kornstørrelse tilsvarende grov silt og grov sand	57
5.6	Rudimentære analyseresultater og akustiske parametre	59
5.7	Fire på rad	61
6	Lydhastighet og tetthet i sedimentkjerner	63
6.1	Tolkning av analyseresultater	63
6.2	Sammenlikning av lydhastighet og tetthet med akustiske parametre	67
6.2.1	Midling over hele kjernelengder	67
6.2.2	Midling over de øverste 20 cm	69
6.3	Sammenlikning av lydhastighet og tetthet med sedimentprøver fra kjernene	70
6.3.1	Midling over hele kjernelengder	70
6.3.2	Midling over de øverste 20 cm	72
7	Diskusjon	74
7.1	Prosessering av bunnkart	74
7.2	Korrelasjoner mellom akustiske og sedimentære parametre	75
7.3	Grabbprøver og sedimentprøver	77
7.4	Lydhastighet og tetthet i sedimentkjerner	78
8	Avslutning og anbefalinger for videre arbeid	79
	Referanser	81

Forkortelser	84
Vedlegg	85
A Teori	85
B Bunnreflektivitet i Nordsjøen	88



Forord

Rapporten er en del av CD&E 1446 Bunntyper Lybin som ble godkjent høsten 2013 for gjennomføring i 2014. CD&E-aktiviteten ble avsluttet i november 2015. For å kvalitetssikre og inkludere analyseresultater for alle bunnprøvene som er tatt i de tre prioriterte havområdene, ble studien utvidet og rapporten ferdigstilt i 2017.

Det rettes en stor takk til kolleger i kartleggingsgruppa ved FFI i Horten som har samlet inn et stort antall sedimentprøver døgnet rundt, og som dermed har muliggjort studien. Fagpersoner fra Norges geologiske undersøkelse har også bidratt på toktene, med både innsamling og kvalifisert analyse av sedimentprøvene. Dette har vært svært viktig støtte for FFI.



1 Innledning

I forbindelse med FFIs omfattende dybdekartlegginger med høyopløselig multistråle-ekkolodd langs kysten av Norge og Barentshavet med forskningsfartøyet M/S H.U. Sverdrup II (figur 1.1) samles samtidig inn reflektivitet/vinkel-uavhengig tilbakespredning (reflectivity/angle independent backscatter) fra havbunnen. Dataene kan benyttes til å lage bunnkart over blant annet estimert sedimenttype og kornstørrelse ved bruk av kommersiell programvare. I slike verktøy ligger allerede a-priori antagelser om forholdet mellom bunnreflektivitet og ulike sedimentegenskaper. For å verifisere resultatene er det en fordel å sammenligne med prøver av havbunnen. I denne rapporten fokuseres det på havbunnsklassifisering i tre områder i Oslofjorden, nordlige Nordsjøen og Trøndelagskysten. Analyseresultater for over 200 bunnprøver sammenlignes med produserte bunnkart. Arbeidet er en stor del av CD&E¹-aktiviteten EP 1446 Bunntyper i Lybin (FFI-oppdrag 501601).

Ved bruk av Lybin for prediksjoner av sonarytelse i geografiske områder der det i dag er lite informasjon om havbunnens beskaffenhet, benyttes ofte standard Lybin bunnmodell. I forbindelse med nevnte CD&E-aktivitet er det tidligere gjort et teoretisk studium av modeller for akustisk tilbakespredningsstyrke (bottom backscattering strength) og refleksjonstap (bottom reflection loss) som et supplement til standard Lybin bunnmodell (Eidem, 2015a). Vi sammenlignet data fra eksperimentelle målinger i nordlige Nordsjøen med prediksjoner av gjenklang og transmisjonstap². I rapporten foreslo vi nye bunnmodeller som baserer seg på kun én parameter til å beskrive havbunnen, nemlig kornstørrelse. Målet med studiene er å kunne utnytte kart over estimert kornstørrelse i enkle bunnmodeller og forbedre prediksjoner av sonarytelse i havområder der vi har liten eller ingen informasjon om havbunnen. En sammenfattet versjon av de to CD&E-rapportene kan leses i eksperimentrapporten (Eidem, 2015a).



Figur 1.1 FFIs forskningsfartøy M/S H.U. Sverdrup II.

¹ Concept Development & Experimentation

² I litteraturen benyttes propagasjonstap vel så ofte som transmisjonstap.

Kapittel 2 omhandler materiale og metoder, og er oppdelt i følgende underkapitler: geografi (kapittel 2.1), innsamling og prosessering av akustiske data (kapittel 2.2), bunnprøvetaking, analysemetoder og relevant bakgrunn for tolkning av analyseresultater (kapittel 2.3), geografisk posisjonering og vanddyp for bunnprøvestasjoner (kapittel 2.4) og til slutt statistiske analyser (kapittel 2.5). I kapittel 3 vises produserte bunnkart for Oslofjorden, Nordsjøen og Trøndelagskysten. Korrelasjonen mellom kartstørrelser og ulike bunnprøve-parametre er tema i kapittel 5. Kapittel 6 viser resultater fra målinger av lyd hastighet og tetthet i sedimentkjerner, og korrelasjonen med kartstørrelser og overflatesedimenter undersøkes. Generelle resultater diskuteres i kapittel 7 og en oppsummering med anbefalinger gis i kapittel 8. Referanser og forkortelser listes på slutten av rapporten, før vedlegg.

Vi har brukt Fledermaus (QPS, 2015) og modulen Fledermaus Geocoder Toolbox (FMGTo³) for prosessering av bunnkart – i ulike versjoner ettersom det har kommet oppgraderinger underveis i studien. Kart vises over 1) bunnreflektivitet (kalles mosaikker i FMGTo) og 2) estimert kornstørrelse basert på «Angular Range Analysis» (ARA) som er en opsjon FMGTo. ArcGIS er brukt for visning av kartene (ESRI, 2015) og MatLab er brukt for beregninger og presentasjon av resultater.

Termen fysiske parametre brukes om målt kornstørrelse, sedimenttype, andel grus/sand/slam, vanddyp osv. Akustiske parametre benyttes om bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse siden disse er basert på prosessering av akustiske data. Geoakustiske parametre innbefatter lyd hastighet og tetthet i sedimentkjernene.

2 Materiale og metoder

2.1 Geografi

Studien omfatter tre havområder langs norskekysten: Oslofjorden (2500 km²), nordlige Nordsjøen (21 500 km²) og Trøndelagskysten (12 000 km²). Til sammen utgjør dette 36 000 km² (figur 2.1). Alle tre områdene har varierende topografi med dybder ned mot 600 m.

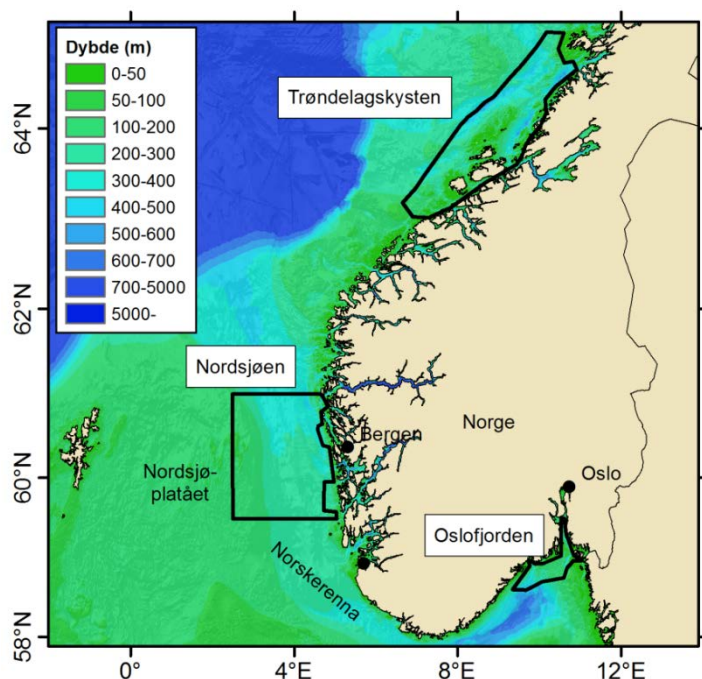
2.2 Akustiske data

Omfattende dybde data som FFI har samlet inn siden 2003, ligger til grunn for produksjonen av bunnkart i studien⁴. Dataene er tatt opp med multistråle-ekkoloddene EM 1002 på frekvens

³ I denne rapporten brukes FMGTo som forkortelse for Fledermaus Geocoder Toolbox. Internasjonalt brukes FMGT, men for ikke å få assosiasjoner til Forsvarets militærgeografiske tjeneste er det lagt til en o.

⁴ Prosedyre for havbunnskartleggingen ved FFI er beskrevet i Eidem m.fl. (2014a).

95 kHz og EM 710 på frekvens 70–100 kHz. Tabell 2.1 gir en oversikt over datafangsten i de tre områdene. Totalt 2 TB med MBES-data⁵ er samlet inn og prosessert. Oppdaterte versjoner av prosesserings-programvaren ble brukt ettersom årene gikk. Av andre årsaker ble forskjellige pingmoder benyttet, og ulempene med dette i forhold til prosessering av bunnreflektivitet diskuteres i kapittel 7.1.



Figur 2.1 Oversiktskart som viser utstrekning og batymetri (EMODnet, 2015) for de tre prioriterte havområdene i studien: Oslofjorden, Nordsjøen og Trøndelagskysten.

Havområde	År	Antall oppdrag	Ekkolodd	Antall GB	PSV
Nordsjøen	2003–09	42	EM 1002 (2003–07)	637	1.2.0–1.3.1
	2012–13		EM 710 (2007–13)		1.3.7–2.2.3
Nordsjøen	2017	1	EM 710	9	2.3.9
Oslofjorden	2010–12	12	EM 710	294	2.1.1–2.2.3
Trøndelagskysten	2008–12	47	EM 710	1112	1.3.7–2.2.3
	2014				2.3.7

Tabell 2.1 Dybdekartlegging i regi av FFI med forskningsfartøyet M/S H. U. Sverdrup II. Innsamlingsår, antall måleoppdrag, ekkolodd, antall gigabyte og versjon av prosesseringsprogramvaren (PSV) er listet. EM 710 ble installert medio 2007, mellom måleoppdrag 10/07 og 19/07.

⁵ Multibeam echo sounder (MBES)

2.2.1 Bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse

Bunnreflektivitet tar utgangspunkt i nivået på signalet som spres tilbake fra havbunnen ved bruk av ekkolodd. For å beregne målstyrken korrigeres mottatt signal for ekkoloddets kildenivå, toveis propagasjonstap, forsterkninger og strålingsdiagram (direktivitet) (se side 290 i Lurton (2002) og side 126 i Lurton og Lamarche (2015)). For beregning av propagasjonstapet tas det hensyn til dybde-avhengig absorpsjonskoeffisient (side 147 i Lurton og Lamarche (2015)). Målstyrken korrigeres for belyst areal/fotavtrykket (avhenger av geometri, strålebredde og pulslengde). Dermed fremkommer tilbakespredningsstyrken, som er en funksjon av strålens vinkel mot havbunnen. Reflektivitet (backscatter) finnes ved å korrigere tilbakespredningsstyrken for vinkel-avhengigheten, slik at denne blir vinkel-uavhengig. I vedlegg A er teori om tilbakespredningsstyrke og målstyrke gjengitt.

I FMGTo ble «Do Tx/Rx Power Gain Correction» og «Apply Beam Pattern Correction» huket av. Førstnevnte medfører at radiometriske⁶ korreksjoner foretas. Sistnevnte har ingen betydning siden korreksjonsverdiene var satt til 0. «Apply Angle Varying Gain Correction» (Flat) ble valgt for å kompensere for vinkelavhengigheten. Dette er nødvendig for å lage mosaikker (geografiske representasjoner av bunnreflektivitet). Vindusstørrelse på 300 ping ble brukt da dette er standard-verdi i FMGTo-versjonene som etter hvert ble benyttet i studien (QPS, 2017). I «Angular Range Analysis» som er en opsjon i FMGTo, er det nettopp vinkelavhengigheten i tilbakespredningsstyrken som benyttes for blant annet å estimere impedans, kornstørrelse, ruhet, gradient, dybde, og sedimenttype. Metoden er nærmere beskrevet i Fonseca og Mayer (2007).

2.2.2 Produksjonen av bunnkart

For å produsere bunnkart har arbeidsprosessen vært å lese Kongsberg *.all-filer inn i FMGTo, lage mosaikk med bunnreflektivitet, og gjøre vinkel-avstands-analyse (ARA).

Parallellprosessering er mulig i deler av kjeden. Bunnkart over ønskede parametre eksporteres til ArcGIS filgeodatabase som rastere, og leses enkelt inn i ArcGIS. For lettere å kunne jobbe på hele områder er flere måleoppdrag (rastere av samme type med samme oppløsning) satt sammen i ArcGIS⁷. Det er ikke kompensert for helning (batymetri) i prosesseringen av bunnkartene.

I FMGTo settes ønsket geografisk oppløsning for mosaikkene. I starten ble 1 og 5 m satt, men dette ga for store datafiler til at det var håndterlig ved eksport til ArcGIS selv på en HP Z820 arbeidsstasjon. Etter hvert ble 20 m oppløsning valgt for mosaikker som skulle eksporteres⁸. For å få 20 m oppløsning i estimert kornstørrelse ble temporære mosaikker med oppløsning 1 m prosessert⁹. Estimert kornstørrelse beregnes separat for babord og styrbord side. Selv om cellestørrelsen tverrskips er lik cellestørrelsen langskips i FMGTo, er verdien lik i alle celler til samme side.

⁶ Radiometri betyr måling av elektromagnetisk strålingsenergi, men brukes også om korreksjoner i forbindelse med bunnreflektivitet.

⁷ Verktøyene Create Mosaic Dataset og Add Rasters to Mosaic Dataset i ArcGIS benyttes. For å se sluttresultatet er det nødvendig å endre enkelte settinger. Her har forfatteren fått hjelp av Geodata.

⁸ Som unntak ble 10 m oppløsning ble valgt for kalibreringslinjene i Nordsjøen.

⁹ Langskips oppløsning for ARA-produkter er i FMGTo satt lik 20 ganger oppløsningen for tilhørende mosaikk.

For å lage skyggerelieff og dybdekart leses urensede Kongsberg *.all-filene inn i Fledermaus Image, griddes med ønsket oppløsning, eksporteres i ESRI-format som *.asc-filer eller geotiff-filer, og leses inn i ArcGIS. Etter hvert ble 25 m oppløsning valgt for Nordsjøen og Trøndelagskysten, og 5 m oppløsning i Oslofjorden. Skyggerelieff av havbunnen lages i ArcGIS¹⁰ basert på dybde-dataene fra Fledermaus Image.

FMGTo har som begrensning i metoden at estimert kornstørrelse er mellom -1 og 9ϕ ¹¹. Kart over estimert kornstørrelse eksporteres feil til ArcGIS av ukjent årsak¹² for verdien 9.0ϕ . Feilen gjør at områder med særdeles fine sedimenter fremtrer som grovkornet i ArcGIS og dataene er derfor korrigert i ArcGIS¹³. Estimert kornstørrelse basert på EM 1002-data (gjelder data fra Nordsjøen) blir regelrett feil i FMGTo, da verdiene blir altfor høye og når maksimumsverdien (9ϕ) over store deler av det prosesserte området.

Bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse er midlet over et sirkulært område med radius 20 og 100 m rundt hver bunnprøvestasjon¹⁴. Dette utgjør i areal henholdsvis $1\,256\text{ m}^2$ og $31\,416\text{ m}^2$. I første omgang ble prosessen gjort manuelt i ArcGIS, senere ble kode skrevet i ArcPython og kjørt fra Eclipse.

2.3 Prøvetaking av havbunnen

FFI har tatt grabbprøver og kjerneprøver fra 215 stasjoner (lokaliteter) i de tre havområdene studien omfavner. Alle bunnprøvene er tatt fra M/S H.U. Sverdrup II og personer fra Norges geologiske undersøkelse (NGU) har bistått FFI under arbeidet på noen av toktene. Totalt 210 av de 215 lokalitetene var oppmålt med multistråle-ekkolodd da studien startet.

Kjerneprøvene er tatt med to forskjellige tyngdekraftsprøvetakere (gravity corer)¹⁵. Den eldste av disse er av ukjent merke og har rørdiameter 63 mm; den nyeste er produsert av KC Denmark og har rørdimensjon 110 mm x 2.5 m (figur 2.2). Totalt omfatter studien 64 sedimentkjerner (tabell 2.2):

- 40 sedimentkjerner med diameter 63 mm tatt i Nordsjøen 2005–2007
- 14 sedimentkjerner med diameter 63 mm tatt i Oslofjorden februar 2013
- 10 sedimentkjerner med diameter 110 mm tatt utenfor Trøndelagskysten høsten 2013

Foruten disse inkluderer studien utvalgte sedimentkjerner tatt i Barentshavet i 2009 for sammenligning.

¹⁰ Verktøyet Hillshade i ArcGIS benyttes.

¹¹ Enheten defineres i kapittel 2.3.2 i rapporten.

¹² Feilen er rettet opp i versjon 7.6. Versjon 7.4.1a og 7.4.2 ble brukt i studien for alle måleoppdrag med unntak av det siste oppdraget fra 2017. Prosesseringen av dette ble gjort med versjon 7.7.3.

¹³ Verktøyet Con i ArcGIS benyttes etter først å ha fått en oversikt over alle unike verdier i datasettet. Feilen er rapportert til QPS. Resulterende raster-datasett er benyttet videre i studien.

¹⁴ Verktøyet Extract by circle i ArcGIS/ArcPy benyttes. Bunnprøveposisjonene konverteres først til UTM med verktøyet Convert Coordinate Notation i ArcGIS.

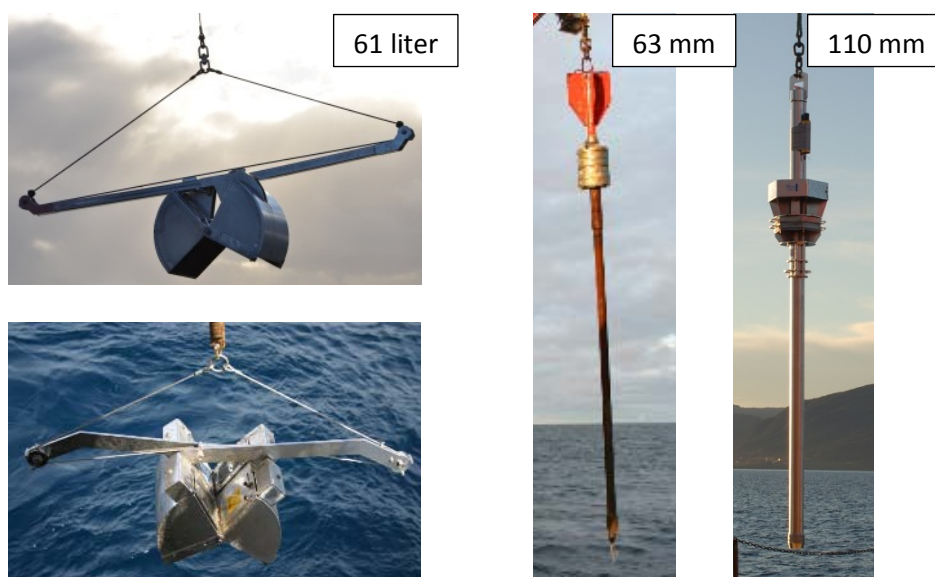
¹⁵ Kalles derfor også gravitasjonsprøver.

Havområde	Antall stasjoner	Innsamlingsår	Rørdiameter (mm)	Rapport fra UiB utgitt år
Oslofjorden	14	2013	63	2013
Nordsjøen	8	2005	63	2006 og 2007
Nordsjøen	16	2006	63	2006
Nordsjøen	16 ^a	2007	63	2008
Trøndelagskysten	10	2013	110	2014 og 2015
Samlet	64			
Barentshavet ^b	13	2009	63 og 110	2010

Tabell 2.2 Sedimentkjerner tatt av FFI i perioden 2003–2013 og analysert ved UiB.

^a Tre av disse er fra Korsfjorden.

^b Analyseresultater fra disse er tatt med som referanse.

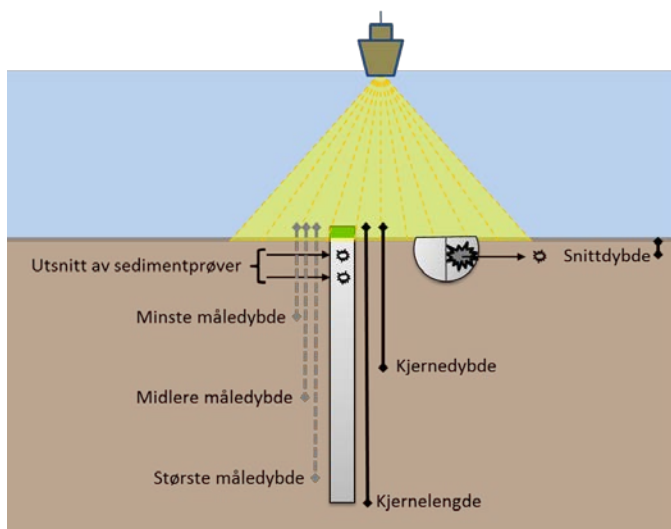


Figur 2.2 Grabbprøvetakere og gravitasjonsprøvetakere brukt på tokt med M/S H.U. Sverdrup II.

Alle sedimentkjernene ble sendt til Universitetet i Bergen (UiB) for måling av blant annet lydshastighet og tetthet (kapittel 2.3.1). Ved UiB ble det også tatt 65 utsnitt for analyse av kornfordeling (kapittel 2.3.2). Ulike begreper relatert til sedimentkjerner illustreres i figur 2.3. Kjernelengdene (total lengde av kjernene) fra Oslofjorden, Nordsjøen og Trøndelagskysten spenner fra 28 til 256 cm, med et gjennomsnitt på 138 cm inklusiv eventuelt oasis (tabell 2.3).

Totalt omfatter studien 151 grabbprøver (tabell 2.4). Disse er tatt med to forskjellige prøvetakere fra KC Denmark. Den største har ytre dimensjoner 62 cm x 41 cm x 31 cm (2500 cm², 61 liter); den minste har foreløpig ukjent størrelse (figur 2.2). Grabbprøvene ble analysert rudimentært om bord på tokt ved å se, føle og smake på sedimentet. Som oftest ble dette arbeidet gjort i samarbeid med fagpersoner fra NGU. For å systematisere analysen ble etter

hvert et skjema for visuell beskrivelse¹⁶ utarbeidet og tatt i bruk. Fra 60 av grabbprøvene tok vi ut noen få desiliter som ble sendt til analyse for kornfordeling ved UiB (kapittel 2.3.2). Vi tok fotografier av de aller fleste prøvene på dekk, og siden overflaten ofte havner som et søkk midt i prøven er denne lett å se på bildene. Til sammen 17 grabbprøvetakinger ble filmet med et GoPro videokamera på toktet langs Trøndelagskysten i 2013.



Figur 2.3 Skisse av datainnsamling med multistråle-ekkolodd og bunnprøvetaking. Ulike begreper som benyttes i rapporten, illustreres i figuren. Kjernelengde er lengden av hele sedimentkjernen (inkludert et eventuelt oasis-lag i denne studien¹⁷). Lydhastighet og tetthet ble målt i sedimentkjernene, og sedimentutsnitt ble analysert for kornfordeling. Måledybde er definert som kjernerdybde der det eksisterer kvalitetssikrede lydhastighets- og tetthetsmålinger. Fra grabbprøvene ble det først tatt delprøver, og utsnitt av disse ble analysert for kornfordeling. Snittdybde er definert som dybde der det ble tatt delprøver av grabbprøver og utsnitt av kjernerprøver for kornfordelingsanalyse.

	O	N	T	ONT	B	Alle
Minste kjernelengde (cm)	36	44	28	28	40	28
Største kjernelengde (cm)	256	233	228	256	273	273
Midlere kjernelengde (cm)	145 ± 59	144 ± 63	121 ± 71	138 ± 63	152 ± 93	140 ± 67
Antall kjerner	14	16	10	40	7	47

Tabell 2.3 Minste, største og midlere kjernelengde (inkludert et eventuelt oasis-lag) for sedimentkjernene fra hvert havområde (**O**slofjorden, **N**ordsjøen, **T**røndelagskysten 2013 og **B**arentshavet) og samlet..

¹⁶ Skjemaet er utarbeidet av Liv Plassen fra NGU og Ellen Johanne Eidem fra FFI.

¹⁷ Grønn blomsterskum som brukes til å stabilisere sedimentene øverst i kjernen.

Betegnelsen på prøvetakingsstasjoner består av bokstaven G for grabbprøver og C for kjerneprøver, deretter prøvetakingsnummeret det året prøven ble tatt, deretter år adskilt med /. Det ble tatt enten grabbprøve eller gravitasjonsprøve ved én stasjon, ikke begge deler med mindre første prøvetaking var resultatløs. Ved enkelte stasjoner klarte vi å ta verken grabbprøve eller gravitasjonsprøve, og noen få planlagte stasjoner ble kansellert. Det er derfor nummerert flere stasjoner enn antall kornstørrelsesfordeling tilsier. For enkelthets skyld benyttes samme betegnelse om både prøve og stasjon.

Innsamling og tolkning av bunnprøvene er rapportert i ulike FFI-rapporter (Eidem, 2008; Eidem og Landmark, 2008a; Eidem og Landmark, 2008b; Eidem m.fl., 2014b), og i en tidsskrift-artikkel (Eidem og Landmark, 2013). Analysene er rapportert i ulike UiB-rapporter (Haflidason, 2013; Haflidason, 2014; Haflidason m.fl., 2008; Haflidason m.fl., 2006; Haflidason m.fl., 2007).

Havområde	Antall stasjoner	Innsamlingsår	Antall prøver analysert rudimentært
Oslofjorden	14	2013	14
Nordsjøen	37	2004–08	32
Trøndelagskysten	78	2013	79
Trøndelagskysten	22	2015	22
Samlet	151		147

Tabell 2.4 Grabbprøver tatt av FFI i perioden 2004–2015 og analysert rudimentært på tokt.

2.3.1 Målinger av lyd hastighet og tetthet i sedimentkjerner

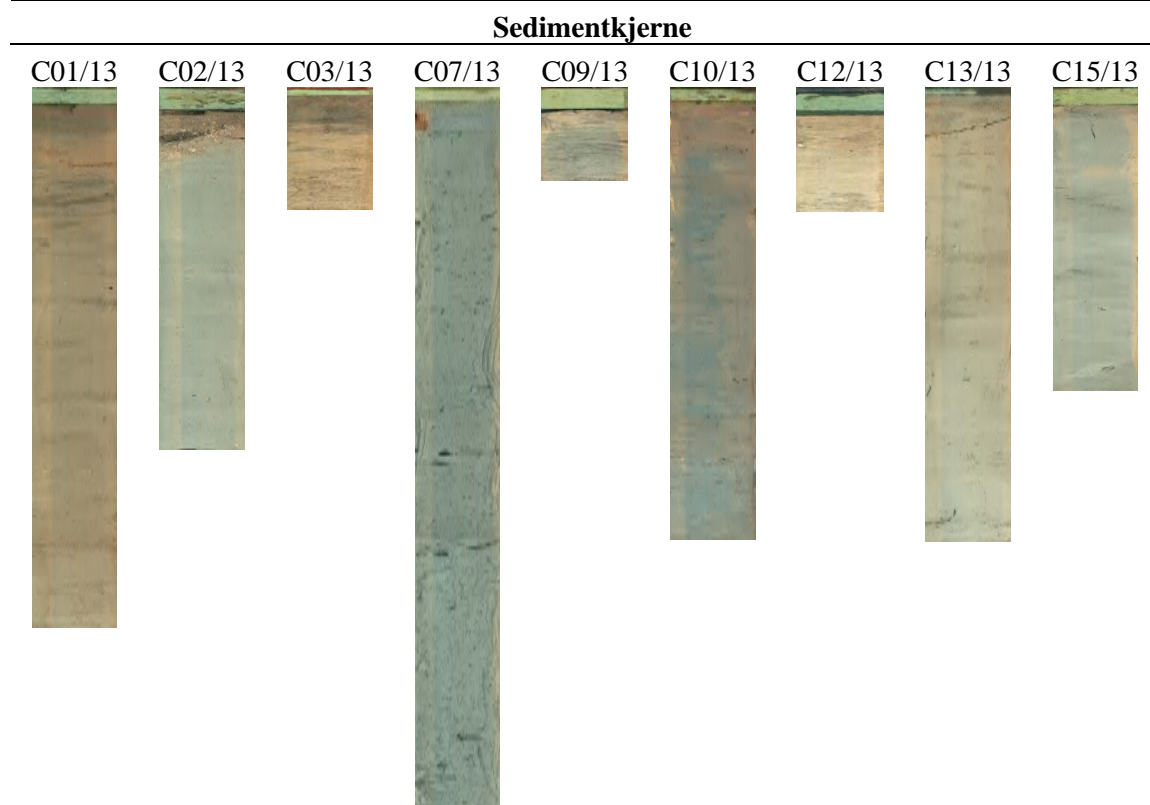
Ved UiB ble sedimentkjernene sendt gjennom GEOTEK Multi Sensor Core Logger (MSCL) for detaljerte målinger av blant annet tetthet og lyd hastighet. Lyd hastigheten ble målt ved hjelp av 250–500 kHz piezoelektriske transdusere. Tettheten ble målt ved å sammenligne dempingen av gammastråler gjennom kjernen med dempingen av gammastråler gjennom aluminium. Analyseresultatene foreligger som filer i Excel med kolonner for ulike parametre versus kjernedybde.

Enkelte kjerner ble splittet før analyse (gjelder tre av prøvene tatt i 2005 og alle tatt i 2006). Kjerner tatt utenfor Trøndelag i 2013 ble splittet etter analyse. Ni av disse ble fotografert (figur 2.4), og de ulike lagene er beskrevet i rapporten. Det ble også tatt fotografier av de splittede kjernene fra 2005 og 2006.

Dessverre er kvaliteten på måleresultatene for de 24 sedimentkjernene fra 2005 og 2006 (tabell 2.2) ikke god nok, og disse er utelatt i rapporten¹⁸. Dårlige analyseresultater kan skyldes til dels at prøvene ble analysert lenge etter prøvetaking, til dels at mange av de tynne kjernene ble splittet før analyse.

¹⁸ Sedimentprøvene fra disse er likevel inkludert i studien.

For kvalitetskontroll sammenlignes lydshastighet og tetthet med analyseresultater for syv sedimentkjerner fra Barentshavet. FFI tok til sammen 13 gravitasjonsprøver med diameter 63 mm og 110 mm i 2009. Kjernene med diameter 63 mm ble målt til å ha høyere lydshastighet versus tetthet enn nærliggende kjerner med diameter 110 mm. Resultatet var overraskende siden det motsatte var forventet. I studien er resultatene for kjernene med diameter 110 mm inkludert, siden vi anser disse som mest pålitelige. Kjernene med diameter 63 mm hadde luft i sedimentet og hulrom mellom sediment og plastrør.



Figur 2.4 Tverrsnitt av ni sedimentkjerner tatt i 2013 utenfor Trøndelagskysten (Hafliðason, 2014). Kjernelengden varierer fra 29 til 243 cm, inklusiv den grønne oasisen. Øverst i C02/13 sees tydelig et sand-lag. Lydshastigheten var dessverre ikke målbar, kun tettheten og denne lå på rundt 2 g/cm³.

2.3.1.1 Korreksjon til referansetemperatur og trykk

Lydshastighetsmålinger ble foretatt ved varierende romtemperaturer¹⁹ og for tolkning av resultatene er det nødvendig å korrigere verdiene til samme trykk og temperatur (Eidem, 2008; Hamilton, 1971). Tabell 2.5 lister multiplikasjonsfaktorene²⁰ som er benyttet i studien for å referere alle lydshastighetsverdier til 23°C og vanddyp 0 m (1 atmosfære trykk), som Bachman

¹⁹ Lydshastighetsverdiene for prøver fra Barentshavet var korrigert til 10°C og dybde 200 m av UiB.

²⁰ Målte verdier multipliseres med tilhørende multiplikasjonsfaktor.

(1985) benytter som referanse. Utregningen er basert på saltholdighet 35 ppm, og formlene brukt i denne studien er gitt på side 37 i Lurton (2002).

Ved bruk av resultatene i akustiske modeller må det konverteres til in-situ vandndyp og temperatur. En hastighet på 1500 m/s under målingene ved 23°C reduseres til 1466 m/s på 300 m dyp og 10°C (multiplikasjonsfaktor 0.977365), det vil si en forskjell på 34 m/s.

Havområde	Gjennomsnittlig temperatur (°C)	Vandndyp (m)	Lydhastighet (m/s)	Multiplikasjonsfaktor
Oslofjorden	22.2 ± 0.6	0	1527.4	1.001350
Nordsjøen	18.75	0	1517.9	1.007570
Trøndelagskysten	22.6 ± 0.4	0	1528.4	1.000671
Barentshavet	10.0	200	1493.1	1.024300

Tabell 2.5 Multiplikasjonsfaktorer for normalisering av lydhastighetsverdier til 23°C og vandndyp 0 m. Faktorene er basert på gjennomsnittstemperatur og vandndyp som under målingene eller ved annen oppgitt referanse. Lydhastigheten i sjøvann (saltholdighet 35 ppm) ved samme temperatur og dybde er også tabulert.

2.3.1.2 Kvalitetssikring av lydhastighetsmålinger

UiB oppgir trykkbølgeamplituder (p-wave velocity amplitudes) som angir signifikansen (påliteligheten) av hver enkelt lydhastighetsmåling, og kun data med trykkbølgeamplituder over en viss terskel²¹ er inkludert i studien. Lydhastigheten var spesielt vanskelig å måle de øverste 10–30 cm av kjernene på grunn av dårlig kontakt mellom sedimentet og plastrøret, og mange målinger i dette dybdeintervallet er flagget ut på grunn av for lav trykkbølgeamplitude. For å kunne sammenligne lydhastighet og tetthet på samme dybde, filtrerer vi i de fleste tilfeller også sedimenttetthet på trykkbølgeamplitude. Det vil si at tetthetsmålinger flagges ut der trykkbølgeamplituden er under terskelen eller der det ikke finnes lydhastighetsmålinger. For å unngå uteliggere ble målinger av lydhastighet mindre enn 1410 m/s, tetthet mindre enn 1.45 g/cm³, endring i lydhastighet på mer enn 10 m/s mellom to måledybder og endring i tetthet på mer enn 0.4 g/cm³ fjernet. Maksimum måledybde er satt til 300 cm i studien (figur 2.3). Minste måledybde for kjernene fra de fire havområdene er forholdsvis lik (tabell 2.6). Midlere måledybde er rundt 80 cm for kjernene fra Oslofjorden, Nordsjøen og Barentshavet, og litt grunnere for kjernene fra Trøndelagskysten.

²¹ Trykkbølgeamplitudene som oppgis ved målinger av lydhastighet med MSCL er relative og skal ligge mellom 0 og 100 %. Terskelen for aksepterte lydhastighetsmålinger ble satt ved trykkbølgeamplitude lik 70 % i studien. Maksimum trykkbølgeamplitude varierer med måleserie av ukjent grunn.

	O	N	T	B	Alle
Minste måledybde (cm)	25 ± 21	17 ± 10	19 ± 10	26 ± 25	21 ± 17
Midlere måledybde (cm)	86 ± 29	82 ± 33	68 ± 25	86 ± 60	81 ± 38
Største måledybde (cm)	141 ± 57	138 ± 60	120 ± 67	145 ± 87	136 ± 66
Antall kjerner	14	16	10	7	47

Tabell 2.6 Gjennomsnittet av minste, midlere og største måledybde for sedimentkjernene fra hvert havområde (Oslofjorden, Nordsjøen, Trøndelagskysten 2013 og Barentshavet) og samlet. Måledybde inkluderer et eventuelt oasis-lag og defineres i studien som en dybde der det er aksepterte målinger av både tetthet og lydshastighet.

2.3.2 Kornfordelingsanalyse på sedimentprøver

I studien ble 125 sedimentprøver fra Oslofjorden, Nordsjøen og langs Trøndelagskysten analysert for kornstørrelsesfordeling. Prøvene er utsnitt fra både grabbprøver og sedimentkjerner, og analysen ble utført av og ved UiB²². Tabell 2.7 viser en oversikt over det analyserte materialet. Totalt inkluderer studien 65 sedimentprøver fra de 64 sedimentkjernene²³ og 60 sedimentprøver fra de 151 grabbprøvene. Fra én av grabbprøvene og to av sedimentkjernene²⁴ ble det tatt utsnitt på to dybder. Snittdybder for sedimentprøver fra kjernene er kjernedybde fratrukket eventuelt oasis-laget.

Sedimentprøver tatt før 2015 ble grovsiktet ved UiB for å skille grus- og sandfraksjonen fra slam-fraksjonen. Prøver fra Nordsjøen ble siktet med et utvalg av følgende sikter: 4 mm, 2 mm, 1 mm, 250 µm, 150 µm, 125 µm og 63 µm. Prøvene fra Oslofjorden og Trøndelagskysten 2013 ble siktet gjennom gradvis mindre sikter med størrelse 2 mm, 500 µm, 150 µm og 63 µm. Tretten av de 30 prøvene fra Trøndelagskysten 2013 ble i tillegg siktet på 40 µm.

Før 2015 ble slamfraksjonen (kornstørrelse < 63 µm i diameter) analysert med Micrometrics Sedigraph 5100 (2006–2007) og Micrometrics Sedigraph III 5120 (2008–2014). I 2015 ble Malvern Mastersizer 3000 tatt i bruk for å analysere sedimentprøver (Haflidason, 2015). Siden denne kan håndtere korn opp til 3.5 mm i diameter, ble prøvene ikke siktet for å skille fra grusfraksjonen. De ulike datasettene og analysemetodene er oppsummert i tabell 2.7. Malvern Mastersizer 3000 bruker laserdiffraksjon for å måle partikkelstørrelse, mens Sedigraph er basert på sedimentasjonsprinsippet. Syv av prøvene fra Trøndelagskysten 2013 ble først analysert med Micrometrics Sedigraph III 5120 i 2014, deretter med Malvern Mastersizer 3000 i 2015. Alle disse var utsnitt fra grabbprøver. Forskjellige versjoner av analyseresultatene for de syv prøvene har versert, og nye utsnitt fra de samme grabbprøvene ble tatt i prosessen. I rapporten er de siste resultatene inkludert.

²² Prøvene ble ikke alltid analysert samme år som innsamlet.

²³ Det ble ikke tatt sedimentprøve av C06/13 fra Trøndelagskysten. Fra de eldste sedimentkjernene ble det tatt flere sedimentprøver, men kun den øverste er inkludert i studien.

²⁴ Dette gjelder G47/13 og C02/13 fra Trøndelagskysten 2013, og C11/13 fra Oslofjorden.

Havområde	Type	Antall stasjoner	Antall utsnitt analysert for kornstørrelsesfordeling
Oslofjorden	Grabb	14	14 ^a
Oslofjorden	Kjerne	14	15 ^a
Nordsjøen	Grabb	37	5 ^a
Nordsjøen	Kjerne	40	40 ^a
Trøndelagskysten	Grabb	78	20 ^b
Trøndelagskysten	Kjerne	10	10 ^c
Trøndelagskysten	Grabb	22	21 ^d
Totalt		215	125

Tabell 2.7 Antall stasjoner og antall analyserte sedimentprøver (utsnitt) fra hvert havområde i studien.

^a Finfraksjonen etter sikting er analysert med Sedigraph.

^b Tretten av prøvene er kun analysert ved sikting. De resterende syv er først siktet, deretter er finfraksjonen analysert med Sedigraph i 2014 og re-analysert med Malvern Mastersizer 3000 i 2015.

^c Prøvene er kun analysert ved sikting. Fra en av sedimentkjernene ble det ikke tatt utsnitt, fra en annen ble det tatt to utsnitt.

^d Prøvene er kun analysert med Malvern Mastersizer 3000. Én av de 21 prøvene inneholdt kun stein.

2.3.2.1 Kornstørrelse og sedimenttyper

Beskrivelsen av sedimenter er ofte relatert til fordelingen av kornstørrelse, men grensen mellom grus og sand, og silt og leir varierer. I studien har vi tatt utgangspunkt i Udden-Wentworths inndeling i forhold til korndiameter, med den forskjell at grensen mellom silt og leir er endret fra 1 til 2 μm (tabell 2.8). Grensen mellom grus og sand er satt ved 2 mm. UiB benyttet i de første analysene 1 mm som største sikte, og utvalgte prøver ble derfor etter ønske fra FFI re-analysert for å bestemme prosentandel korn større enn 2 mm. Slam (korndiameter < 63 μm) er blanding av leir og silt.

Kornstørrelsen er vanlig å måle i ϕ -enhet som

$$M(\phi) = -\log_2 \frac{d}{d_{\text{ref}}}, \quad (2.1)$$

der d er kornstørrelsen i millimeter, og $d_{\text{ref}} \equiv 1$ mm. Motsatt blir

$$\frac{d}{d_{\text{ref}}} = 2^{-M(\phi)}. \quad (2.2)$$

Jo høyere ϕ -verdi, jo mindre er kornet i fysisk utstrekning. Ofte beregnes midlere kornstørrelse for et sediment. Denne kan defineres på ulike måter, og et vanlig mål er midling av 16, 50 og 84 %-kvantilen i ϕ -enhet,

$$M_z(\phi) = -\frac{1}{3} \left(\log_2 \frac{d_{16}}{d_{\text{ref}}} + \log_2 \frac{d_{50}}{d_{\text{ref}}} + \log_2 \frac{d_{84}}{d_{\text{ref}}} \right), \quad (2.3)$$

der for eksempel d_{50} er 50 %-kvantilen i millimeter. M_z omtales som grafisk middel (Jackson og Richardson, 2007) eller middelkornstørrelsen.

Sedimentkategori og beskrivelse		Kornstørrelse $M_z(\phi)$	Kornstørrelse d (mm)
Grus	Grus	< -1	> 2.0
Sand	Veldig grov sand	-1-0	1.0-2.0
	Grov sand	0-1	0.5-1.0
	Medium sand	1-2	0.25-0.5
	Fin sand	2-3	0.125-0.25
	Veldig fin sand	3-4	0.063-0.125
Silt	Veldig grov silt	4-5	0.031-0.063
	Grov silt	5-6	0.016-0.031
	Medium silt	6-7	0.008-0.016
	Fin silt	7-8	0.004-0.008
	Veldig fin silt	8-9	0.002-0.004
Leir	Leir	> 9	< 0.002

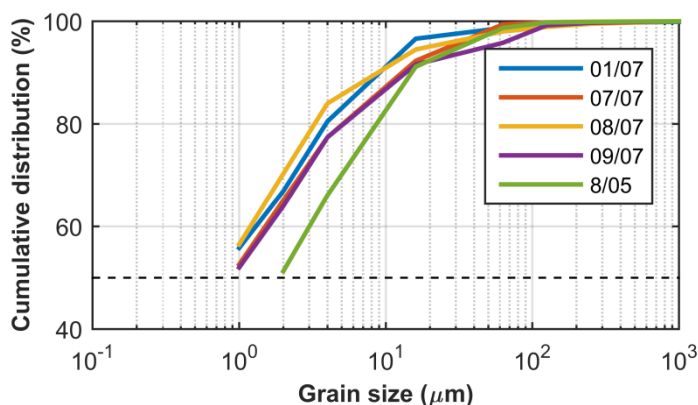
Tabell 2.8 Sedimentkategorier/beskrivelser som er benyttet i studien. Stein er definert som korn med diameter større enn 6.4 cm. For grus og sand er inndelingen som i Udden-Wentworth (Ainslie, 2010), for silt er inndelingen som i GRADISTAT (Blott og Pye, 2001).

For mange av sedimentprøvene i studien er det ikke mulig å beregne midlere kornstørrelse. Det er brukt for få sikter og/eller analysen av slam-fraksjonen er for grov til at det er mulig å bestemme øverste og/eller nederste kvantil. Mediankornstørrelsen benyttes i stedet, definert som

$$Md(\phi) = -\log_2 \left(\frac{d_{50}}{d_{\text{ref}}} \right). \quad (2.4)$$

Adjektivene høyere og lavere brukes i sammenheng med kornstørrelse i ϕ -enhet. Jo lavere ϕ -verdi, jo større fysisk kornstørrelse og grovere sediment.

For grabbprøvene fra Nordsjøen er beregningene av mediankornstørrelse foretatt med penn og papir av FFI basert på kumulative kornstørrelsesfordelingskurver²⁵. For prøvene fra Oslofjorden og Trøndelagskysten er programvaren GRADISTAT versjon 8 benyttet av FFI²⁶ (Blott og Pye, 2001). For enkelte prøver er mediankornstørrelsen estimert ved ekstrapolasjon av kumulative kornstørrelsesfordelingskurver. Det gjelder seks prøver fra Trøndelagskysten 2013²⁷ og fem prøver fra Nordsjøen²⁸ (figur 2.5). Sedimentkategoriene vi benytter i rapporten er basert på mediankornstørrelsen og inndeling som i tabell 2.8.



Figur 2.5 Kumulativ kornstørrelsesfordeling for fem prøver fra Nordsjøen der FFI bestemte mediankornstørrelsen ved hjelp av ekstrapolasjon.

Så lenge det siktes på 2 mm og 63 µm påvirkes verken sand-, grus- eller slaminnholdet av mangelfull sampling av fin- og/eller grovfraksjonen. Tidligere studier har vist at andel sand/grus gir vel så bra samsvar med bunnkart basert på klassifisering av data fra enkeltstrålekkolodd, som mediankornstørrelse (Eidem og Landmark, 2013).

I en studie ved NGU sammenlignes resultater fra Sedigraph med Coulter LS200 som også benytter laser for bestemmelse av kornfordeling (Rise og Brendryen, 2013). Leirinnholdet (< 2 µm) målt med Coulter LS200 er omtrent en fjerdedel av mengden målt med Sedigraph, og mengden materiale mindre enn 20 µm er også noe for lavt. Andel silt er tilsvarende for høyt. NGU foreslår å beregne et ekvivalent leirinnhold dersom laser-måleresultatene skal benyttes for klassifisering av sedimenter. Vi kjenner ikke til om Malvern Mastersizer 3000 også måler for

²⁵ Dette ble foretatt på lineær skala. På logaritmisk skala blir mediankornstørrelse noe lavere for de fineste sedimentene (leir).

²⁶ Det er viktig ved bruk av GRADISTAT at ett sikte grovere enn det som er benyttet under analysen, settes inn i programvaren. Prosentandel grus og sand blir feil dersom dette ikke gjøres. Det er også viktig at siktestørrelser som ikke er brukt, fjernes i GRADISTAT. En annen utfordring har vært at den grovste fraksjonen av sedimenter siktes og veies, mens den resterende fineste fraksjonen kjøres gjennom analyseapparat. Det forsvinner noe materiale underveis som det må kompenseres for.

²⁷ Kjerneprøve 01/13, 03/13, 09/13, 10/13 og 15/13 – og grabbprøve 59/13.

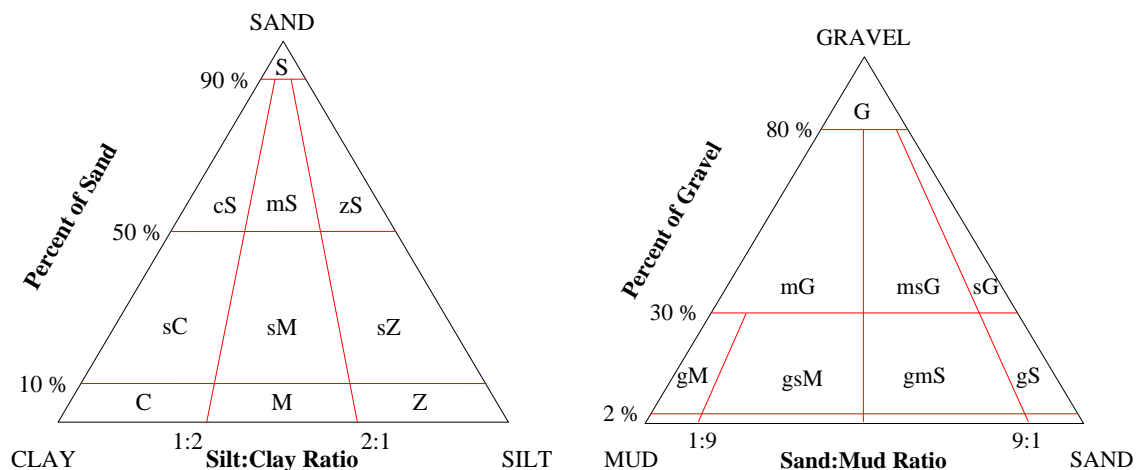
²⁸ Kjerneprøve 08/05, 01/07, 07/07, 08/07 og 09/07.

lavt leirinnhold. I så fall blir mediankornstørrelsen feil dersom denne er større enn $4\phi^{29}$. Slaminnholdet påvirkes ikke av en eventuell feilmåling av leirinnholdet som beskrevet over.

I studien er bimodale sedimentprøver som regel flagget ut. Bimodalitet er definert som når sandinnholdet er lavere enn både grus- og slaminnholdet. Dette gjelder tre sedimentprøver fra Oslofjorden (fra én grabbprøve og to sedimentkjerner) og fire sedimentprøver fra Trøndelagskysten i 2013 (alle fra grabbprøver), til sammen syv prøver.

2.3.2.2 Klassifikasjon

Sedimenter kan klassifiseres etter ulike metoder. I denne studien og i Eidem og Landmark (2013) er sedimentprøver med mindre enn 2 % grus klassifisert etter Folks klassifikasjonssystem (Folk, 1954), basert på andelen leir, silt og sand. Sedimentprøver med mer enn 2 % grus er klassifisert etter en modifisert versjon av Folks klassifikasjonssystem, der det ikke er noen grense mellom 2 % og 30 % grus og klassen grusholdig sandholdig slam (gsM) er introdusert med den konsekvens at klassen grusholdig slam (gM) er snevret inn til å gjelde prøver med maksimum 10 % sand og 30 % grus. Figur 2.6 viser begge systemene som benyttes i denne rapporten.



Figur 2.6 Folks klassifikasjonssystem er brukt for å klassifisere sedimentprøver med mindre enn 2 % grus (t.v.). Prosentandel leir, silt og sand benyttes. En alternativ versjon er brukt for å klassifisere prøver med mer enn 2 % grus (t.h.). Prosentandel slam, sand og grus benyttes. Merk at den opprinnelige klassen gM er splittet i gM og gsM. Forkortelser på engelsk: G=gravel, mG= muddy gravel, msG=muddy sandy gravel, sG=sandy gravel, gM=gravelly mud, gsM=gravelly sandy mud, gmS=gravelly, muddy sand, gS=gravelly sand, C=clay, M=mud, Z=silt, sC=sandy clay, sM=sandy mud, sZ=sandy silt, cS=clayey sand, mS=muddy sand, zS=silty sand, and S=sand.

²⁹ Mediankornstørrelsen underestimeres i ϕ -enhet (blir for lav, indikerer grovere sediment enn faktisk), dersom Malvern Mastersizer 3000 måler feil på samme måten.

2.3.2.3 Lydhastighet, tetthet og kornstørrelse

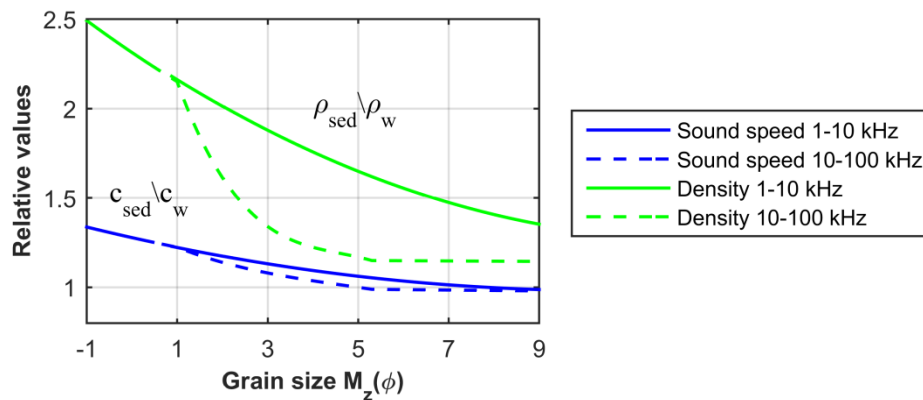
Lydhastighet c og tetthet ρ i et overflatesediment kan estimeres ut fra middelkornstørrelsen M_z ved å bruke regresjons-relasjoner fra Bachman (1985) for kontinentalsokkelen og skråningen. De akustiske målingene ble foretatt på 200 kHz. Bachman (1985) (som igjen refererer til Hamilton og Bachman (1982)) estimerer relativ lydhastighet og tetthet. Ved 23°C og 1 atm³⁰ estimeres lydhastighet og tetthet som funksjon av kornstørrelse,

$$\begin{aligned} \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} &= 2.380 - 0.1725M_z + 0.00689M_z^2 & (0.81 < M_z(\phi) < 10.7), \\ c \text{ (m/s)} &= 1952 - 86.3M_z + 4.14M_z^2 & (0.81 < M_z(\phi) < 9.7). \end{aligned} \quad (2.5)$$

I følge Ainslie (2010) gjelder likning (2.5) ved 1–10 kHz. For grovere sedimenter enn 0.81 ϕ refererer Ainslie (2010) til

$$\begin{aligned} \rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = \rho_{\text{HF}} &= 2.370 - 0.1747M_z + 0.00799M_z^2 & (-1 < M_z(\phi) < 0.5), \\ c \text{ (m/s)} = c_{\text{HF}} &= 1954 - 86.3M_z + 4.14M_z^2, \end{aligned} \quad (2.6)$$

der c_{HF} og ρ_{HF} er lydhastighet og tetthet i frekvensområdet 10–100 kHz. Figur 2.7 viser forholdet mellom relativ lydhastighet/tetthet og kornstørrelse for både 1–10 kHz og 10–100 kHz. Sistnevnte frekvensområde er ikke relevant i denne studien.



Figur 2.7 Forholdet mellom midlere kornstørrelse og lydhastighet/tetthet i et sediment (Ainslie, 2010).

Ved å anta samme kornstørrelse kan forholdet mellom lydhastighet og tetthet beregnes basert på likningene (2.5) og (2.6). Metoden kan diskuteres, siden likningene er basert på regresjonsanalyse med kornstørrelse som uavhengig variabel. Resultatet vises i figur 2.8. Lydhastigheten øker fra 1500 m/s ved 1.4 g/cm³ til 2000 m/s ved 2.5 g/cm³. I samme figur vises også at forholdet mellom lydhastighet og tetthet er forholdsvis likt dersom det antas at

³⁰ Ved temperatur 23°C og trykk 1 atm er lydhastigheten og tettheten i vannvolumet henholdsvis 1529.4 m/s og 1.0242 g/cm³ ved saltholdighet $S = 35$.

vannvolumet har lyd hastighet 1500 m/s og tetthet 1 g/cm³, i stedet for temperatur 23°C og 1 atm trykk som tilsvarer 1529.4 m/s og 1.024 g/cm³ (Lurton, 2002).

En direkte relasjon mellom lyd hastighet og tetthet i et sediment er gitt i Bachman (1985), og ved 23°C og 1 atm er denne lik

$$c \text{ (m/s)} = 2390 - 1358\rho + 524.6\rho^2 \quad (1.25 < \rho(\text{g/cm}^3) < 2.1). \quad (2.7)$$

Sammenlikning av de to relasjonene i figur 2.8 viser små forskjeller innenfor felles gyldighetsområde.

Richardson og Briggs (2004) har basert på laboratorieanalyser av rundt 800 sedimentkjerner fra 69 lokaliteter (inkludert Nordsjøen), funnet følgende regresjons-relasjon mellom lyd hastighet og tetthet:

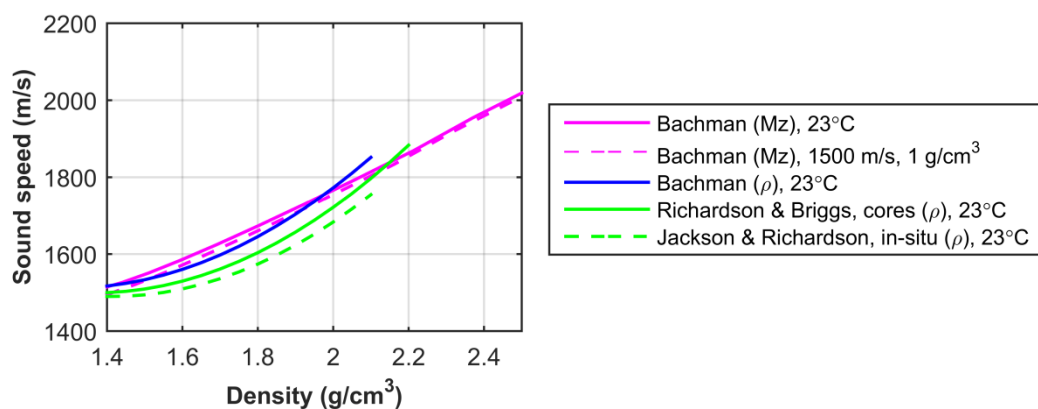
$$c \text{ (m/s)} = 2522 - 1500\rho + 549.8\rho^2 \quad (1.1 < \rho \text{ (g/cm}^3) < 2.2). \quad (2.8)$$

Sedimentkjernene var fra de øverste 30 cm av havbunnen og de akustiske parametrene ble målt i 1 cm-intervall på 400 kHz — i løpet av det første døgnet etter innsamling. Sedimentprøver ble tatt i 2 cm-intervall for analyse av kornstørrelse.

Basert på målinger av akustiske parametre ved bruk av in-situ sedimentakustiske målesystem på rundt 85 lokaliteter fant Jackson og Richardson (2007) følgende regresjons-relasjon,

$$c \text{ (m/s)} = 2607 - 1583\rho + 560.4\rho^2 \quad (1.2 < \rho \text{ (g/cm}^3) < 2.1). \quad (2.9)$$

Sistnevnte målinger ble foretatt på 38 og 58 kHz. Sammenlikning av regresjons-relasjonene i figur 2.8 viser at Bachman (1985) estimerer lyd hastigheten litt høyere enn Richardson og Briggs (2004) som igjen estimerer lyd hastigheten litt høyere enn Jackson og Richardson (2007) ved samme tetthet.



Figur 2.8 Lyd hastighet versus tetthet i sediment. Referanser er gitt i teksten.

Målingene referert til over er foretatt på frekvenser fra 38 til 400 kHz. I vår studie ble lydshastighet i sedimentkjernene målt ved 250–500 kHz som er i samme frekvensområde som målingene til Richardson og Briggs (2004). Jackson og Richardson (2007) bemerker at resultatene fra laboratorieanalysene (400 kHz) og in-situ-verdiene (38 kHz) viser stort samsvar. Buckingham (2005) presenterer in-situ målinger av lydshastighet for frekvenser mellom 25 og 100 kHz. Ekstrapolering viser en økning på ca. 20 m/s fra 10 og 100 kHz. I et annet eksperiment viser in-situ målinger en økning i lydshastighet på ca. 40 m/s mellom 3 og 80 kHz (Simpson m.fl., 2003). I begge referansene foretas målingene i et medium-sandholdig sediment og lydshastigheten er rundt 1700 m/s. Frekvensavhengigheten er omtrent 1 % per dekode. Resultatene i vår studie bør derfor være sammenlignbare med referansene over, eventuelt kan vi forvente at lydshastigheten er litt høyere enn hos for eksempel Jackson og Richardson (2007).

2.3.3 Kvalitativ analyse av grabbprøver

Alle grabbprøvene i studien er analysert rudimentært ved å se, føle og smake på sedimentet. For å dra nytte av resultatene, er alle sedimentprøvene gruppert basert på sedimentbeskrivelser og/eller klassifisering foretatt på tokt.

Fire sedimentgrupper benyttes i studien:

- Grove sedimenter (coarse)
- Sand (sand)
- Sandholdig slam (sandy mud)
- Slam (mud)

2.4 Posisjonering og vanddyp

Posisjonen til en bunnprøvestasjon er bestemt på forskjellig vis opp gjennom årene. I nyere tid er det ofte festet en transponder til kabelen som prøvetakingsutstyret er festet til. Transponderen kan måle både vanddyp og posisjon, og på toktet i Oslofjorden ble begge parametrene logget. På toktet langs Trøndelagskysten i 2013 ble kun dybde logget av tekniske årsaker. På toktet langs Trøndelagskysten i 2015 ble sannsynligvis ikke transponderen brukt. I eldre tider ble bunnprøveposisjonen satt lik fartøyets senter eller hekken 25 m akterut, og eventuell drift i kabelen ble ikke tatt hensyn til. Summa summarum er det noe usikkerhet i eksakt posisjon, og for å gjøre det likt forhåpentligvis, refererer posisjoner for bunnprøvene til fartøyets senter.

Foruten å måle vanddypet ved hjelp av transponder, kan verdien leses av fra enkeltstråle-ekkoloddet EA 600 idet prøvetakingsutstyret treffer havbunnen. Ikke rent sjelden er det usikkerhet beheftet ved dybde-dataene fra dette ekkoloddet og/eller transponder, og en subjektiv vurdering av dataverdiene er nødvendig – gjerne sammenlignet med loggbok fra tokt. Dessuten er lydshastigheten i EA 600 satt til 1500 m/s som er litt for høyt.

Målt vanddyb er i studien definert som 1) transponderdybde addert avstanden mellom transponder og prøvetakingsutstyr, 2) ekkolodd-dybde eller 3) et gjennomsnitt av disse verdiene. I noen få tilfeller ble vanddybet ikke målt med noen av metodene.

Ved hjelp av Fledermaus Image er som nevnt griddede dybdekart produsert basert på MBES-data. For å kvalitetssikre målte vanddyb og ta høyde for usikkerhet i bunnprøveposisjonene, er ArcGIS brukt til å midle griddede dybdata i et sirkulært område med radius på 20 m rundt hver bunnprøvestasjon. Dybdataene fra Oslofjorden ble griddet med 5 m oppløsning; dybdataene fra Nordsjøen og Trøndelagskysten ble griddet med 25 m oppløsning.

Videre i denne rapporten brukes vanddyb om gjennomsnittet av målt vanddyb og ArcGIS-vanddyb. For enkelte stasjoner er målt vanddyb flagget ut i preprosesseringen på grunn av for stort avvik fra ArcGIS-dybde. Når enten målt vanddyb eller ArcGIS-vanddybet ikke er tilgjengelig, er vanddybet satt lik den som foreligger.

2.5 Statistiske analyser

For å undersøke korrelasjonen mellom to uavhengige variable³¹ beregnes Pearsons korrelasjonskoeffisient r (Bhattacharyya og Johnsen, 1977):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2.10)$$

Korrelasjonskoeffisienten³² ligger mellom -1 og $+1$, og gir et mål på styrken av og retningen på den lineære relasjonen mellom de to variablene, uavhengig av måleenhet. r^2 av variabiliteten i y kan forklares med et lineært forhold til x (r^2 oppgis ofte i prosent). I rapporten presenteres kvadrert korrelasjonskoeffisient, med unntak av i sammendraget.

Korrelasjonen defineres som svak dersom $r < 0.1$ ($r^2 < 0.01$), moderat dersom $r < 0.3$ ($r^2 < 0.09$) og sterk dersom $r > 0.5$ ($r^2 > 0.25$). Fargene rød, gul og grønn brukes i tabellene i rapporten for visualisering av korrelasjonsstyrke.

For å vurdere korrelasjonen beregnes sannsynligheten p for feilaktig å forkaste nullhypotesen H_0 : det er ingen korrelasjon mellom variablene mot den alternative hypotesen H_1 : det er en korrelasjon mellom variablene. I studien settes signifikansnivået til 5 %. Det betyr at p -verdien må være < 0.05 for å forkaste nullhypotesen og betrakte korrelasjonen som signifikant.

Regresjonsanalyser foretas der det er ønskelig å predikere verdiene for en eller flere uavhengige variable (prediktorer) basert på en samling av avhengige variable (responser) (Johnsen og

³¹ Variable og parametre brukes om hverandre i rapporten.

³² Pearsons korrelasjonskoeffisient kalles også «sample correlation coefficient».

Wichern, 1988). I lineær regresjonsanalyse er responsen $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ en lineær funksjon av de ukjente parametrene $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_r]$.

De uavhengige variablene

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1r} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nr} \end{bmatrix} \text{ kan være av første grad eller høyere.}$$

Målefeil og andre variable som ikke er med i modellen faller inn under feilvariabelen $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]$.

På komponentform blir responsen

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_r x_{ir} + \varepsilon_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i. \quad (2.11)$$

Bestemmelseskoeffisienten (coefficient of determination) er lik

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.12)$$

og ligger mellom 0 og 1. Denne gir et mål på korrelasjonen mellom målte observasjoner y_i og predikerte verdier \hat{y}_i basert på en lineær modell. R^2 representerer andelen av variabiliteten i y som kan forklares med den valgte modellen. Jo lavere verdi for R^2 , jo dårligere samsvar. Modell-koeffisientene bestemmes ved minste kvadraters metode.

Når modellen kan skrives som et førstegradspolynom ($\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x$) blir

$$R^2 = r^2. \quad (2.13)$$

Ved beregninger av gjennomsnittsverdier i studien oppgis ofte ett standardavvik.

3 Batymetri og sedimentprøver

De tre havområdene i studien har alle dybder ned til 600 m (tabell 3.1). Minimum dybde er rundt 10 m og dette avhenger naturlig nok av hvor nært kysten, øyer og grunner kartleggingen er foretatt. Midlere dybde i de tre områdene varierer noe. Den midlere helningen og standardavviket for dybde-dataene viser at det er minst variasjon i Nordsjøen.

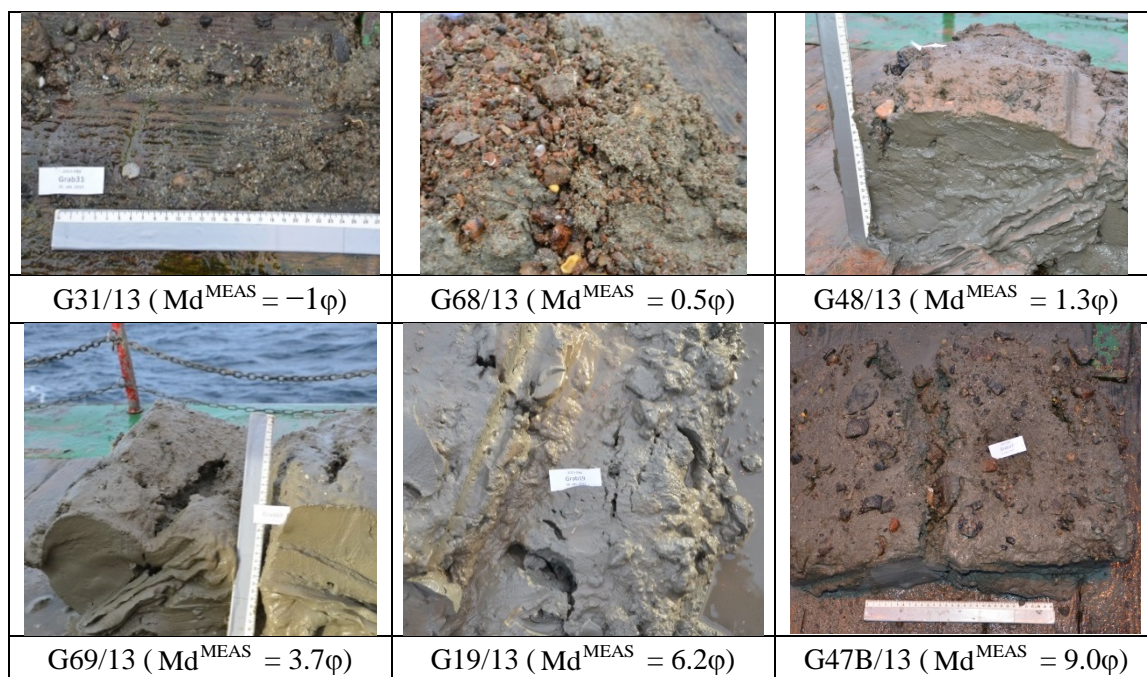
Det ble tatt 125 sedimentprøver fra Oslofjorden, Nordsjøen og langs Trøndelagskysten som ble analysert for kornstørrelsesfordeling. Målt mediankornstørrelse og andel sand/grus er beregnet for alle prøvene. Midlere kornstørrelse og andel sand/grus for de 118 unimodale sediment-utsnittene er listet i tabell 3.2. Spredningen i sedimenttype er stor for prøvene fra alle tre havområdene. Prøvene fra Trøndelagskysten var i gjennomsnitt grovere enn prøvene fra Nordsjøen og Oslofjorden. En av årsakene til dette er bevisst planlegging av stasjoner der grovere sediment var forventet å finne ut fra allerede produserte kart over estimert kornstørrelse. Figur 3.1 viser fotografier av utvalgte grabbprøver, og mediankornstørrelse for sediment-utsnittene er oppgitt.

Område	Oslofjorden	Nordsjøen	Trøndelagskysten
Oppløsning for terrengmodell (m)	5	25	25
Minimum dybde (m)	17	7	18
Maksimum dybde (m)	575	552	546
Midlere dybde og standardavvik (m)	201 ± 113	283 ± 51	223 ± 100
Maksimum helning (grader)	89	83	74
Midlere helning (grader)	5.7	0.9	4.6

Tabell 3.1 Metadata for terrengmodellene av de tre havområdene i studien.

	O	N	T13	T15
Minimum mediankornstørrelse (φ)	1.0	0.9	-1.0	-1.0
Maksimum mediankornstørrelse (φ)	9.5	11.0	8.2	7.2
Midlere mediankornstørrelse (φ)	6.4 ± 2.7	6.6 ± 2.6	4.6 ± 2.3	4.8 ± 1.9
Minimum andel sand og grus (%)	3	1	6	3
Maksimum andel sand og grus (%)	90	100	79	100
Midlere andel sand og grus (%)	26 ± 30	27 ± 31	47 ± 26	36 ± 25
Antall unimodale prøver	26	45	26	21

Tabell 3.2 Mediankornstørrelse og andel sand/grus for de 118 unimodale sedimentprøvene fra Oslofjorden, Nordsjøen og Trøndelagskysten (2013 og 2015) som er analysert for kornstørrelse.



Figur 3.1 Fotografier av grabbprøver tatt på tokt utenfor Trøndelagskysten i 2013. Utsnitt ble sendt til UiB analyse for kornstørrelsesfordeling. Mediankornstørrelsen er oppgitt for hvert enkelt utsnitt. For grabbprøve G47/13 ble det tatt to utsnitt og sendt til analyse, 47B er fra det nederste, finkornige sedimentet. Fotografiene viser utfordringen med å velge hvor utsnitt skal tas.

4 Bunnkart

Kart over målt bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse (kapittel 2.2.1) er produsert for både Oslofjorden, Nordsjøen og Trøndelagskysten. Vi har brukt samme fargeskala i de tre havområdene. Bunnreflektiviteten varierer fra -6 til -61 dB³³, med høyest gjennomsnitt på Trøndelagskysten og lavest i Nordsjøen (tabell 4.1).

Estimert kornstørrelse varierer fra -1 til 9ϕ som er yttergrensene i FMGT₀. For verifisering plottes målt kornstørrelse for de 118 unimodale sedimentprøvene fra havbunnen over estimert kornstørrelse. Det samme gjøres for prøvene som er analysert rudimentært og gruppert.

³³ For mosaikk-datasettene i ArcGIS. Raster-datasettene divergerer noe av uforklarlige årsaker.

Område	Oslofjorden	Nordsjøen	Trøndelagskysten
Minimum bunnreflektivitet (dB)	-6	11	-6
Maksimum bunnreflektivitet (dB)	-5	-61	-58
Midlere bunnreflektivitet (dB)	-26 ± 4	-28 ± 4	-23 ± 5
Minimum estimert kornstørrelse (φ)	-1		-1
Maksimum estimert kornstørrelse (φ)	9		9
Midlere estimert kornstørrelse (φ)	4.3 ± 2.3		2.5 ± 2.2

Tabell 4.1 Minimum, maksimum og midlere verdier for bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse³⁴ i de tre havområdene i studien.

Oslofjorden er kartlagt i nyere tid med EM 710. Bunnreflektiviteten varierer mye (figur 4.1), men nærliggende måleoppdrag sammenfaller og det har ikke vært nødvendig med normalisering. En visuell sammenligning med mediankornstørrelsen (kapittel 2.3.2), viser til dels bra samsvar; høy bunnreflektivitet observeres der sedimentene er grovkornet (figur 4.2). Rudimentære analyseresultater (kapittel 2.3.3) sammenfaller også (figur 4.3).

Normalisert kart over bunnreflektivitet i Nordsjøen viser i grove trekk relativt høye verdier nær kysten og på Nordsjøplataet, og mye lavere nivåer i Norskerenna (figur 4.4). Det er mulig å ane hvor grensene for de ulike måleoppdragene går i kartet. Vi kan også se nivåforskjeller som skyldes bruk av forskjellige pingmoder innenfor samme måleoppdrag, da det ikke er tatt hensyn til dette i normaliseringen³⁵. Bunnreflektivitet før normalisering av måleoppdragene viser mye større forskjell mellom måleoppdragene, se vedlegg B. I januar 2017 ble det i løpet av ett døgn kjørt kalibreringslinjer med EM 710 i Nordsjøen for kontroll (Eidem m.fl., 2017). Målt bunnreflektivitet i 2017 sammenfaller såpass godt med normalisert bunnreflektivitet basert på EM 1002-data at det er vanskelig å se forskjell i figur 4.4.

I et tidligere arbeid er Nordsjøen klassifisert akustisk ved å bruke data fra enkeltstråle-ekkolodd og QTC IMPACT (Eidem og Landmark, 2013). Fem ble funnet å være optimalt:

1. Leir og silt
2. En variasjon av leir, silt og sand
3. Sandholdig slam med grus
4. Sand med grus
5. Leir og sandholdig leir

Figur 4.5 viser utstrekningen av de fem klassene. Ved sammenligning med bunnreflektivitetskartet observeres forholdsvis stor likhet i Norskerenna og nær kysten, mens det er større divergens i vest, spesielt i overgangen mellom Norskerenna og Nordsjøplataet, og i sydvest. For hver sedimentprøve som er analysert for kornstørrelse vises Folk-klasse (kapittel 2.3.2), og prosentvis andel grus og sand. Prosentvis andel sand/grus viser vel så bra samsvar med de fem

³⁴ For raster-datasettene som er benyttet ved midling rundt bunnprøvestasjoner.

³⁵ I nye versjoner av FMGTo kan det korrigeres for ulike pingmoder.

sedimentklassene som mediankornstørrelse. I Lygren (1984) er det også gjort en klassifisering av området, som er verdt å studere nærmere ved en senere anledning.

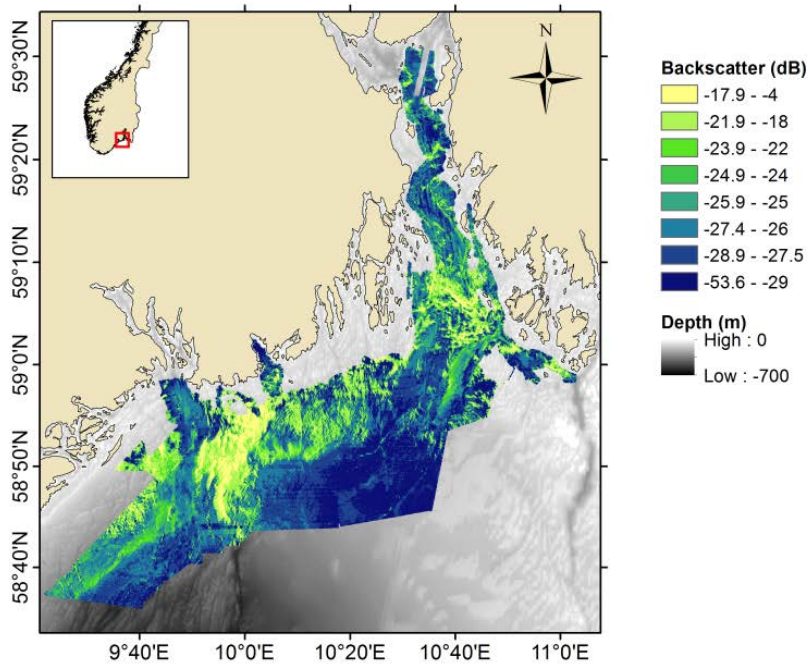
Dataene som ble tatt opp med EM 1002, kan ikke foreløpig benyttes til å estimere kornstørrelse i FMGTo. Dataene som ble tatt opp med EM 710 i 2008–13 dekker kun Nordsjøplataet og noen mindre områder nær kysten. Forholdet mellom bunnreflektivitet (BS) og estimert kornstørrelse M^{EST} fra FMGTo er beregnet for bunnprøvestasjoner i Oslofjorden og for grabbprøvestasjoner langs Trøndelagskysten. Lineær regresjon basert på verdiene midlet i en radius 20 m rundt hver stasjon ga³⁶

$$M^{EST}(\varphi) = -0.289 \cdot BS \text{ (dB)} - 4.154. \quad (4.1)$$

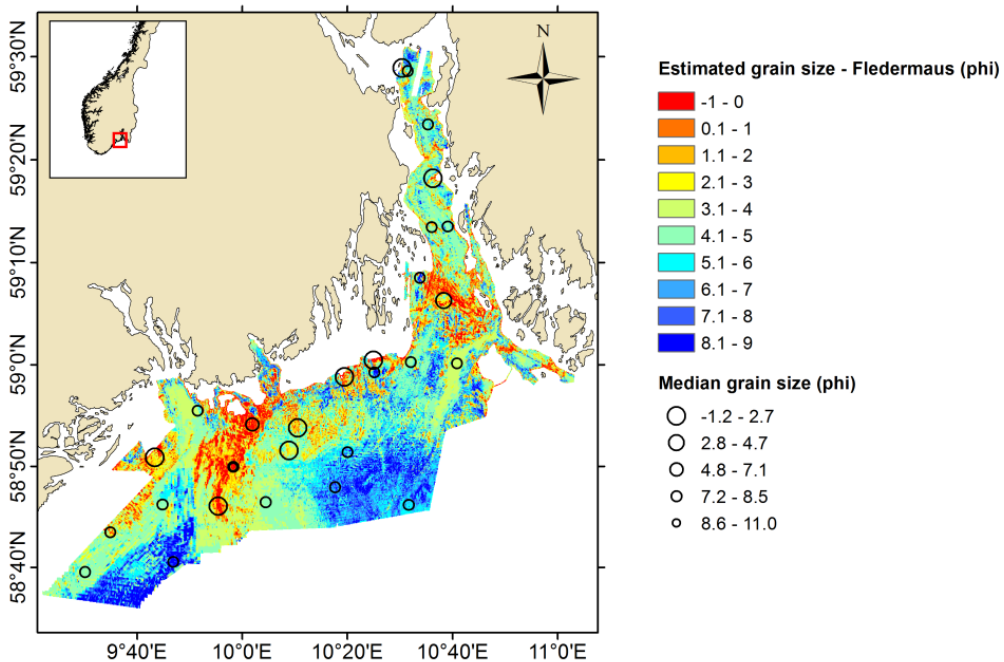
Basert på likning (4.1) er kornstørrelsen estimert indirekte for hele Nordsjøen, og resultatet vises i figur 4.6. Overlagt dette er kornstørrelsen estimert i FMGTo i områder der det finnes EM 710-data, og ved sammenligning av nærliggende måleoppdrag sees en del forskjeller. Det er også forskjeller mellom områder kartlagt med EM 710 i de tidligste måleoppdragene fra 2008 og 2009. Estimert kornstørrelse for kalibreringslinjene kjørt med EM 710 i 2017 viser dårlig samsvar med indirekte estimert kornstørrelse basert på EM 1002-data i områder der det er fine sedimenter, som i Norskerenna (figur 4.7). I områder med grovere sedimenter er korrelasjonen mye bedre. Rudimentære analyseresultater passer tydelig bedre overens med estimert kornstørrelse fra EM 710-data i områdene med finere sedimenter (figur 4.7). Det gjenstår å lage et kart over estimert kornstørrelse i Nordsjøen som normaliserer EM 1002-nivåene i samsvar med estimert kornstørrelse for de nye kalibreringslinjene.

Kartlegging av Trøndelagskysten har vært prioritert av FFI de siste årene. Dybde-dataene er fra 2008 og senere, og tatt opp med EM 710. Kart over bunnreflektiviteten viser stor spredning (figur 4.8). I Frohavet nord for Hitra er det finkornede sedimenter med lav bunnreflektivitet. Utaskjærs er det store områder med høy bunnreflektivitet. Kartet over estimert kornstørrelse tegner omtrent det samme bildet med kornstørrelse ned mot -1φ som er laveste mulige verdi i FMGTo (figur 4.9). De finkornede områdene har en verdi rundt $4-5\varphi$ som tilsvarer (veldig) grov silt. Kun et fåtall steder er estimert kornstørrelse oppunder 9φ . I sør-vest utpeker et avgrenset område seg med kornstørrelse $2-3\varphi$ (fin sand). Rudimentære analyseresultater for området vises i figur 4.10. NGU har foretatt en helhetlig analyse av omtrent det samme området og publisert resultatet på mareano.no (figur 4.11). NGU har blant annet basert seg på data fra FFI, men også fra andre kilder. Opptil 33 klasser benyttes ved beskrivelse av sedimentene; de fleste er basert på Folks inndeling. Likheten mellom NGUs kart og kartet over estimert kornstørrelse er stor. Ved bruk av NGUs kart trengs en konvertering mellom Folk-klasse og parametre som kan benyttes i akustiske modelleringsverktøy.

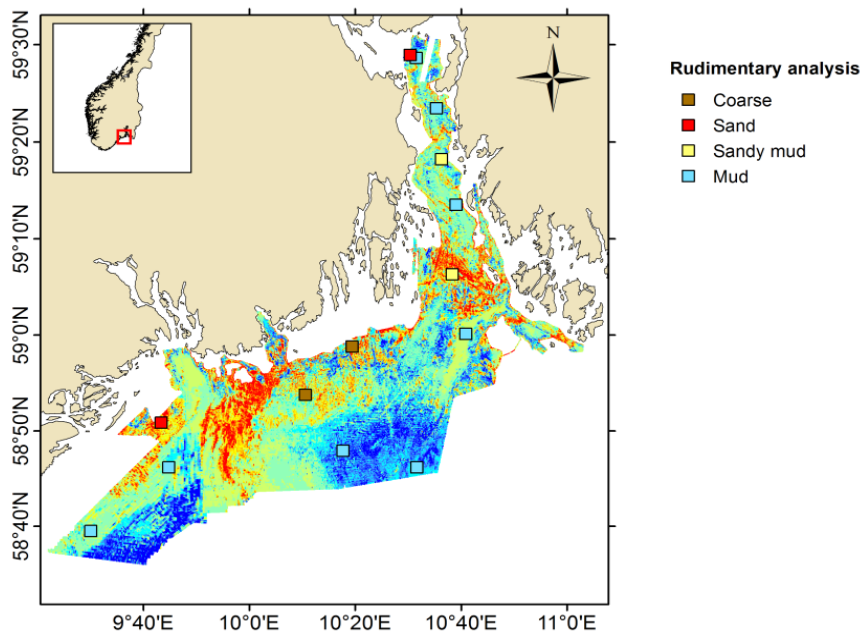
³⁶ Punkter med estimert kornstørrelse lik -1φ og $>8.8\varphi$ er flagget ut.



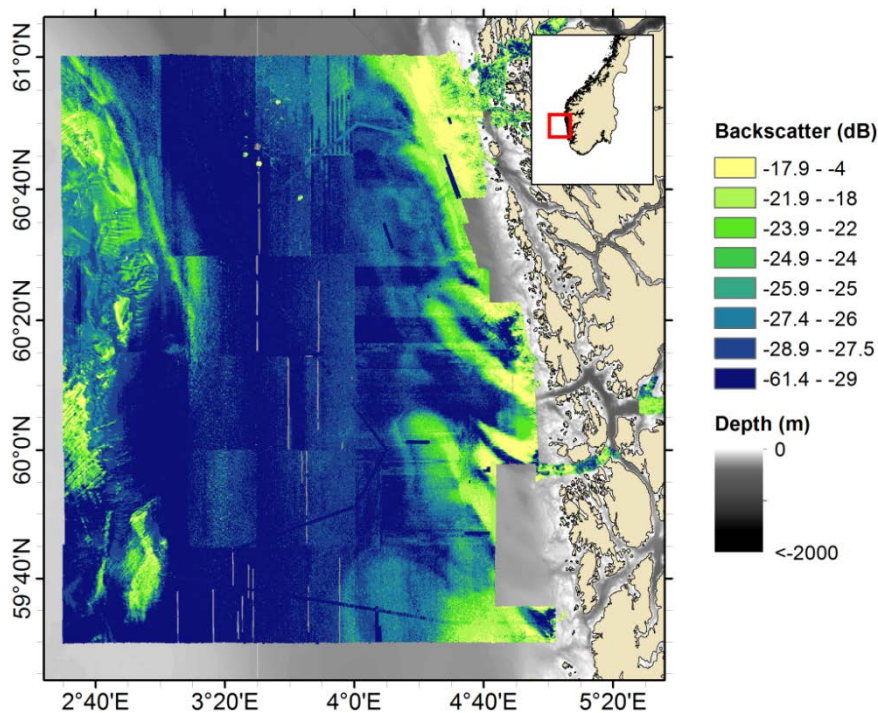
Figur 4.1 Kart over bunnreflektivitet i Oslofjorden. Fledermaus versjon 7.4.2 med oppløsning 20 m.



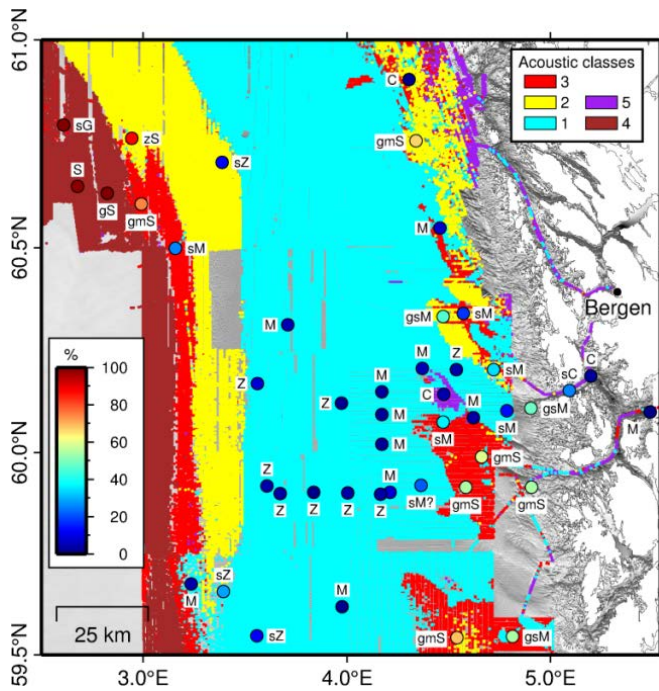
Figur 4.2 Kart over sedimenttype i Oslofjorden. Målt mediankornstørrelse vises for sedimentprøvene som er analysert.



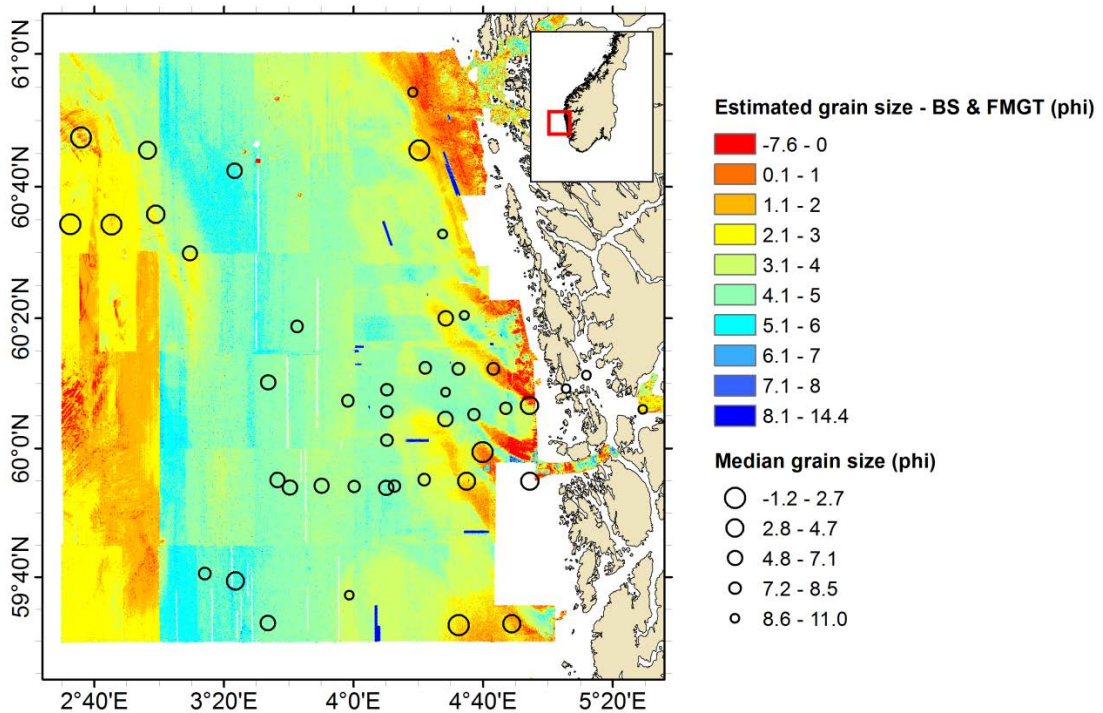
Figur 4.3 Inndeling av grabbprøver fra Oslofjorden i fire grupper basert på rudimentær analyse.



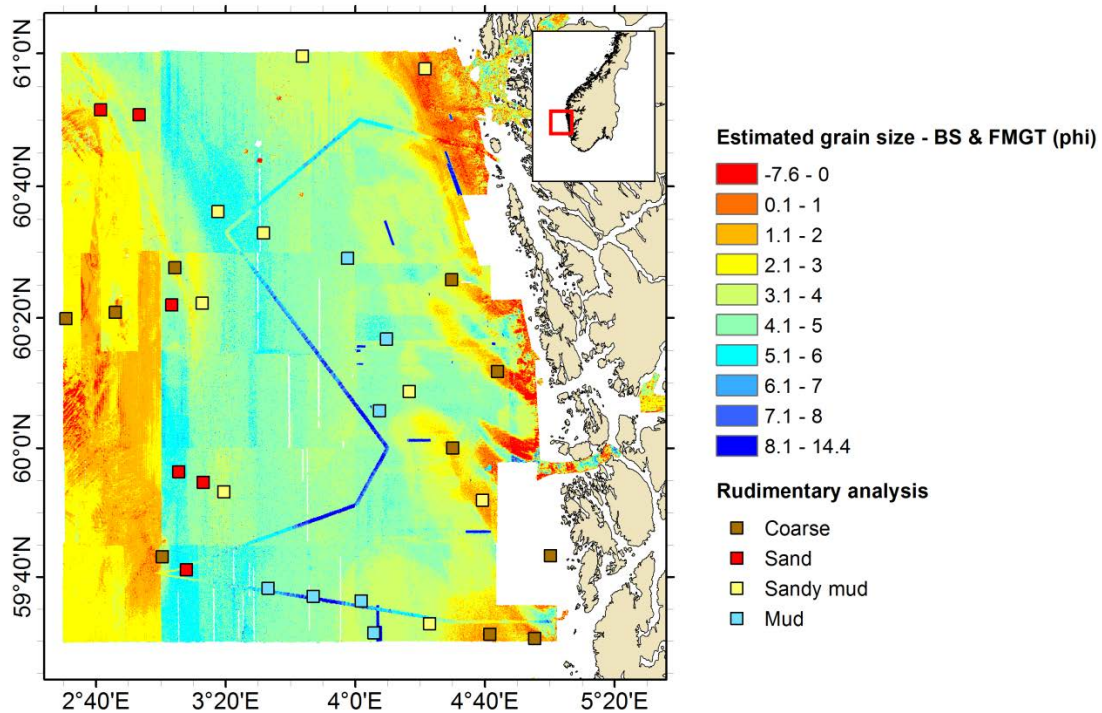
Figur 4.4 Kart over normalisert bunnreflektivitet i nordlige Nordsjøen. Fledermaus versjon 7.4.1a med oppløsning 20 m. Kalibreringslinjer fra 2017 er lagt over.



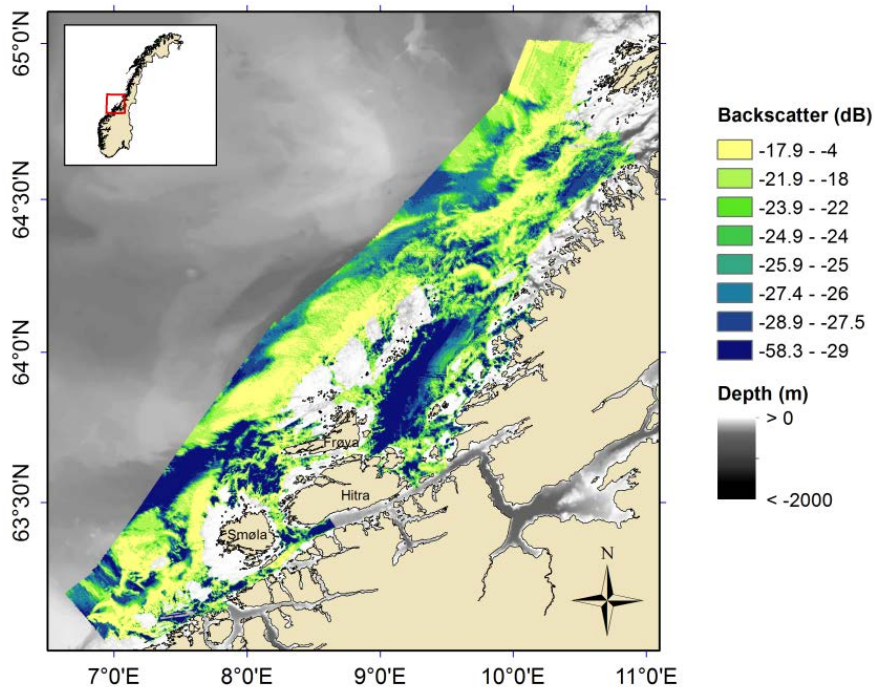
Figur 4.5 Klassifisering av havbunnen utenfor Bergen basert på enkeltstråle-ekkolodd og sedimentprøver av havbunnen. De fem akustiske klassene er beskrevet på side 2.



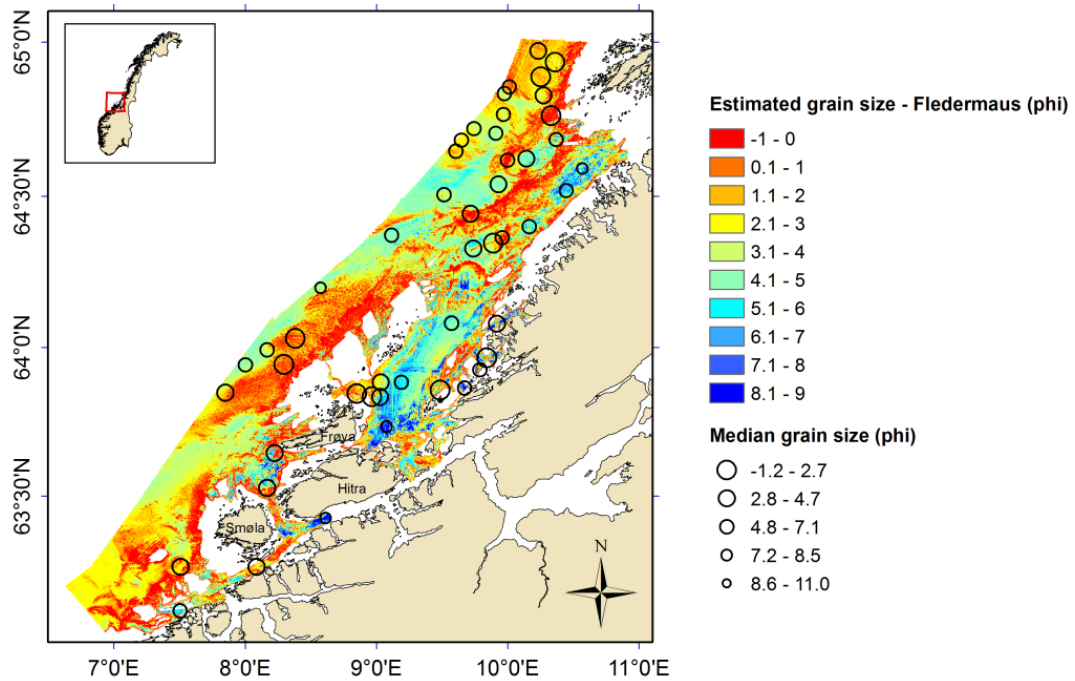
Figur 4.6 Estimert kornstørrelse for nordlige Nordsjøen basert på likning (4.1) og resultater fra FMGT. Målt mediankornstørrelse vises for sedimentprøvene som er analysert.



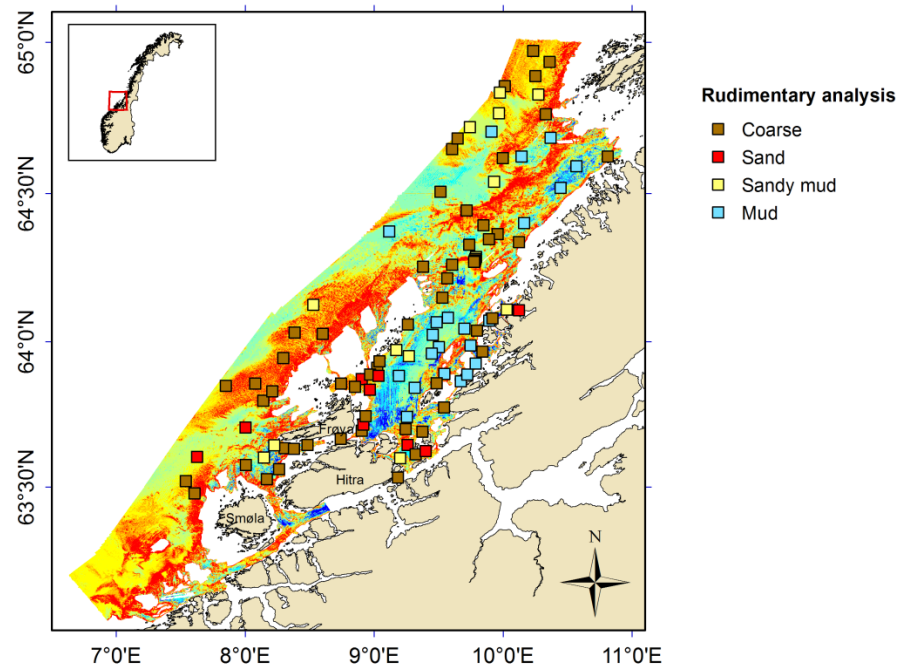
Figur 4.7 Estimert kornstørrelse for EM 710-data tatt opp i 2017 lagt over kartet i figur 4.6. Inndeling av grabbprøver i fire sedimentgrupper basert på rudimentære analyser.



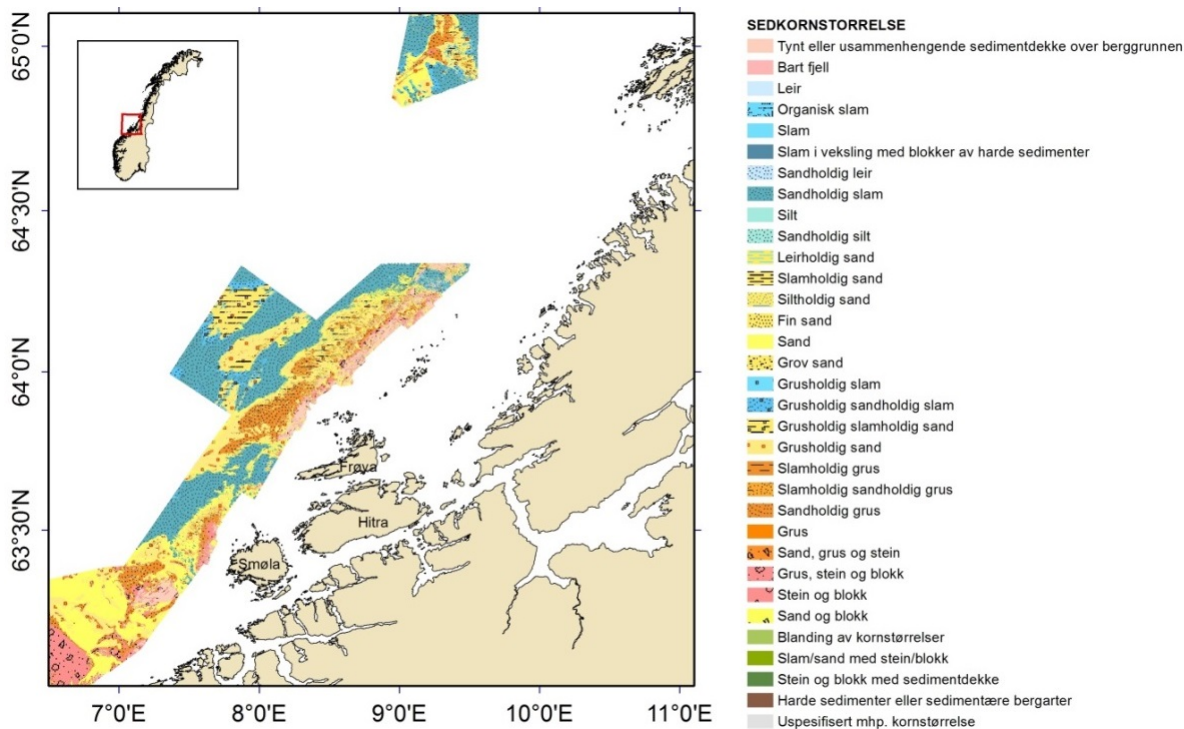
Figur 4.8 Kart over bunnreflektivitet langs Trøndelagskysten. Fledermaus versjon 7.4.2 med oppløsning 20 m.



Figur 4.9 Kart over sedimenttype langs Trøndelagskysten. Målt mediankornstørrelse vises for sedimentprøvene som er analysert.



Figur 4.10 Inndeling av grabbprøver i fire sedimentgrupper basert på rudimentære analyser.



Figur 4.11 Sedimentkart prosessert av og gjengitt med tillatelse fra Norges geologiske undersøkelse (NGU, 2015).

5 Korrelasjoner mellom fysiske og akustiske parametre

Forholdet mellom akustiske og fysiske parametre studeres nærmere i dette kapittelet. Som nevnt er de akustiske dataene fra FMGTo midlet over et sirkulært område med radius 20 og 100 m rundt hver bunnprøvestasjon (210 av totalt 215 stasjoner er kartlagt med ekkolodd³⁷). I kapittelet presenteres resultater ved 20 m midling dersom ikke annet er oppgitt. Kornstørrelse oppgis i ϕ -enhet. Jo høyere ϕ -verdi, jo mindre kornstørrelse i metrisk måleenhet. Følgende flagges ut om ikke annet er nevnt:

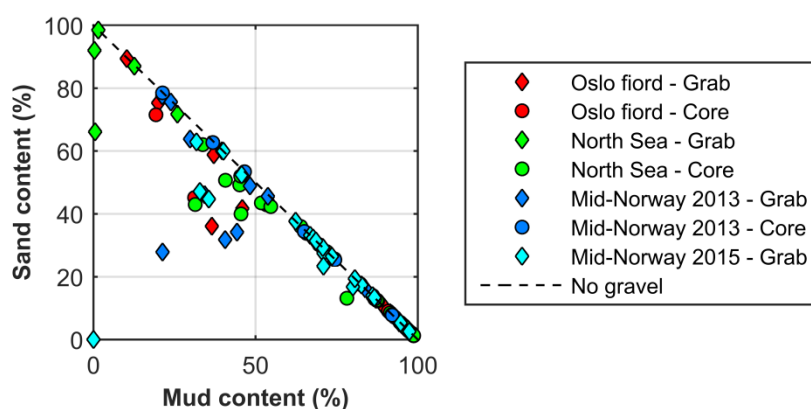
- Syv bimodale sedimentprøver fra syv stasjoner i Oslofjorden og Trøndelagskysten
- Tre sedimentprøver fra tre stasjoner Korsfjorden på Vestlandet
- Den nederste av doble sedimentprøver fra sedimentkjerner (gjelder tre stasjoner)

³⁷ Fire av de fem stasjonene som ikke er kartlagt med MBES, ligger i Nordsjøen (to av disse er i Korsfjorden), den femte er på Trøndelagskysten.

Lineære regresjonslinjer vises i figurene. Om ikke annet står eksplisitt, er dette førstegradspolynomer (rette linjer) der bestemmelseskoeffisienten blir lik korrelasjonen kvadrert ($R^2 = r^2$) som nevnt i kapittel 2.5.

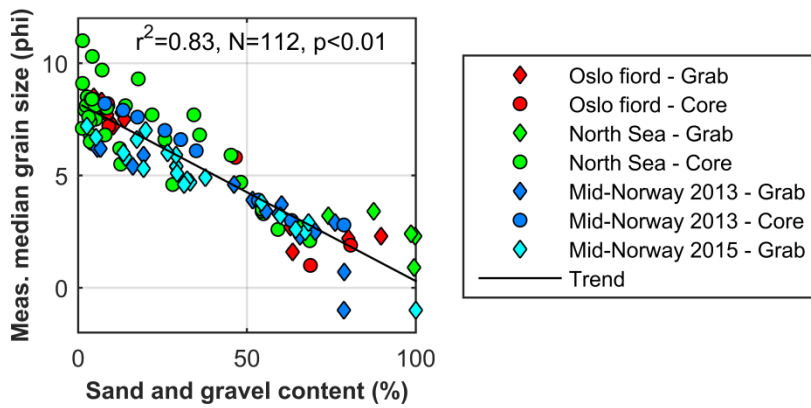
5.1 Fysiske parametre

Flesteparten av de 112 unimodale sedimentprøvene inneholder lite grus. Dette ses ved at punktene ligger på den stiplede linjen i figur 5.1. Totalt 31 prøver har mer enn 2 % grus, og 13 prøver har mer enn 10 % grus. Korrelasjonen er meget sterk mellom målt kornstørrelse og andel sand/grus ($r^2 = 0.83$) (figur 5.2).

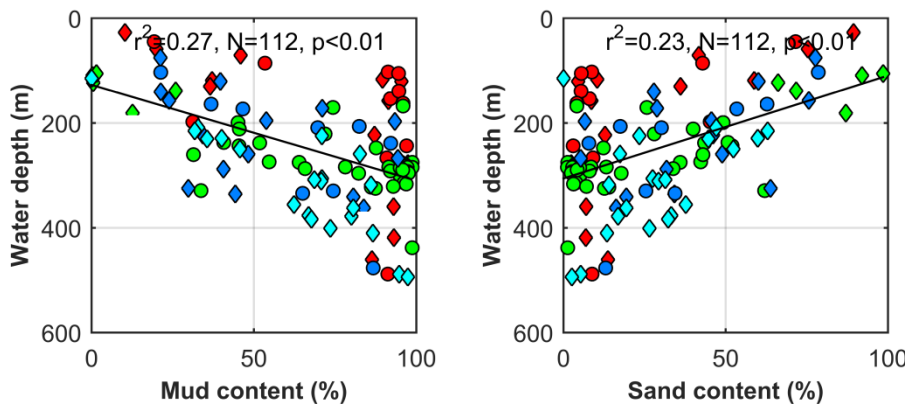


Figur 5.1 Prosentandel slam og sand i analyserte sedimentprøver ($N=112$). Prøvene som ikke ligger på den stiplede linjen, inneholder grus.

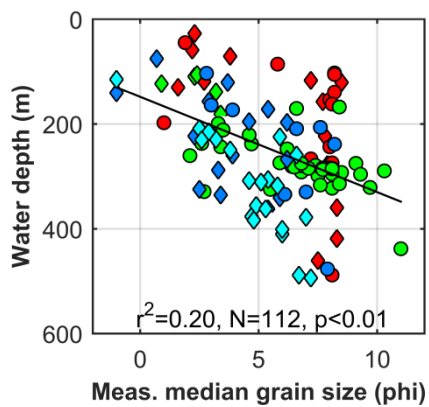
Slam legger seg ofte i de dypere havområdene, og korrelasjonen mellom vanddyp og slaminnholdet er $r^2 = 0.27$. Det er noe svakere korrelasjon mellom vanddyp og sandinnholdet enn mellom vanddyp og slaminnhold (figur 5.3). Korrelasjonen mellom vanddyp og mediankornstørrelse er i samme størrelsesorden (figur 5.4). En hovedoppgave ved UiB om blant annet sedimentologi i nordøstlige Nordsjøen viser en viss sammenheng mellom middelkornstørrelse og vanddyp, men korrelasjonen er dessverre ikke beregnet (Lygren, 1984). I hovedoppgaven er utsnitt fra de øverste 2–4 cm av 128 sedimentkjerner tatt med gravitasjonsprøvetaker, analysert for kornfordeling.



Figur 5.2 Målt mediankornstørrelse versus andel sand/grus i analyserte sedimentprøver.

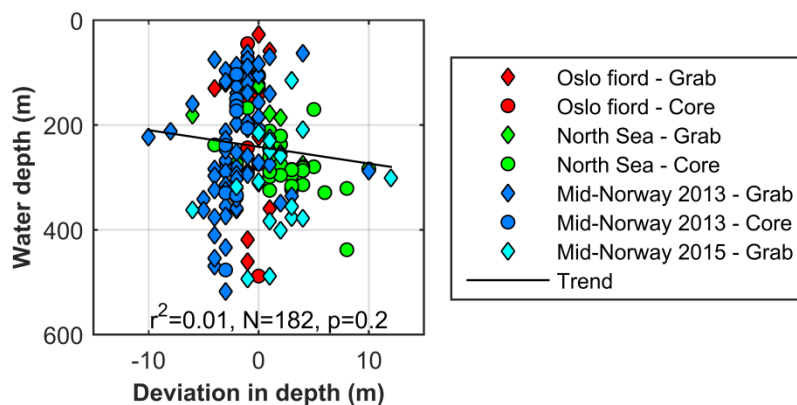


Figur 5.3 Prosentandel slam og sand i analyserte sedimentprøver versus vanddyb.



Figur 5.4 Målt kornstørrelse versus vanddyb.

Vannndypet kan som nevnt i kapittel 2.4 bestemmes på flere måter. Differansen mellom målt vannndyp og vannndypet beregnet ved geografisk midling i ArcGIS er mindre enn ± 12 m (figur 5.5). Differansen er ikke korrelert med vannndypet ($r^2 = 0.01$ og $p = 0.2$). I og med at posisjonen til en stasjon kan være unøyaktig av forskjellige årsaker, er differansen innenfor hva vi kan forvente og betyr at dybdeberegninger ved geografisk midling i ArcGIS kan benyttes til å kvalitetssikre målte vannndyp.

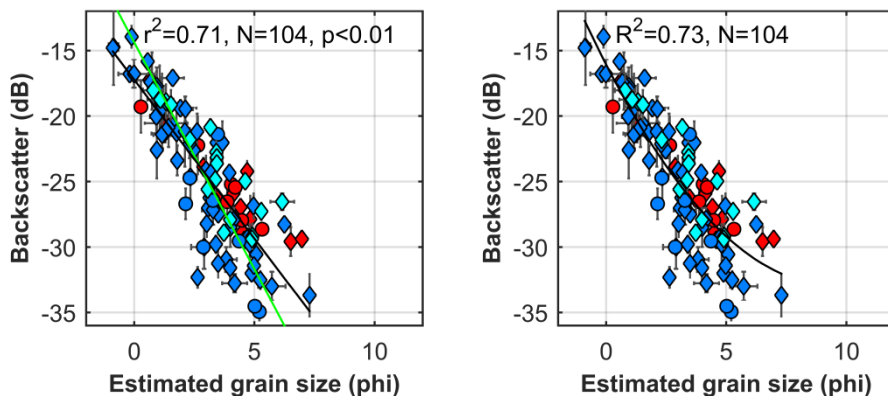


Figur 5.5 Differansen mellom vannndyp fra ArcGIS og målt vannndyp, versus vannndyp.

5.2 Akustiske parametre for prøvestasjoner i Oslofjorden og på Trøndelagskysten

Estimert kornstørrelse i ϕ -enhet øker som forventet tydelig med synkende bunnreflektivitet for samme stasjon³⁸ (figur 5.6). Korrelasjonen er sterk ved tilpasning av både førstegrads- og andregradspolynom (henholdsvis $R^2 = 0.71$ og $R^2 = 0.73$). I figuren vises resultatet for 104 stasjoner; det inkluderer også stasjoner der bunnprøven kun ble analysert rudimentært. Data fra Nordsjøen er ikke med i datagrunnlaget på grunn av vansker med prosessering av EM 1002-dataene. Til sammen 26 stasjoner er flagget ut av forskjellige årsaker og disse undersøkes nærmere i kapittel 5.4.

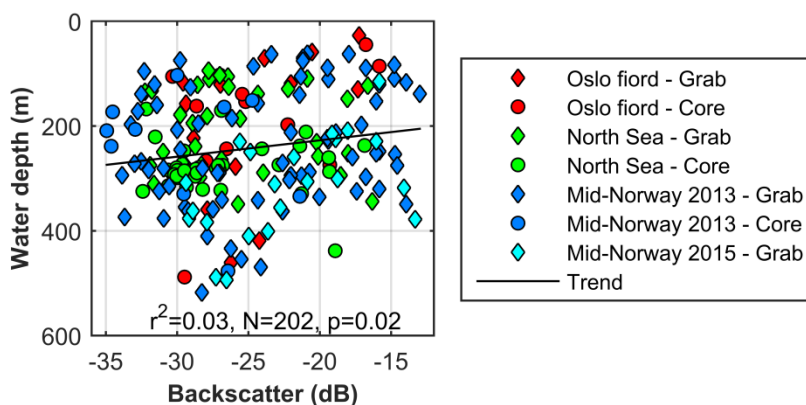
³⁸ Forholdet mellom estimert kornstørrelse og bunnreflektivitet kan beregnes for alle griddpunkter i kartene, men kun der det er stasjoner er valgt ut her.



Figur 5.6 Estimert kornstørrelse for 104 stasjoner i Oslofjorden og på Trøndelagskysten versus estimert bunnreflektivitet (med ett standardavvik markert). Den grønne linjen viser relasjonen som er brukt for å beregne estimert kornstørrelse i Nordsjøen basert på bunnreflektivitetsdata (jmfør likning (4.1)). Lineære regresjonslinjer med førstegrads- (t.v.) og andregradspolynom (t.h.) vises også. Figur 5.12 inkluderer stasjonene som er flagget ut over.

5.3 Fysiske og akustiske parametre

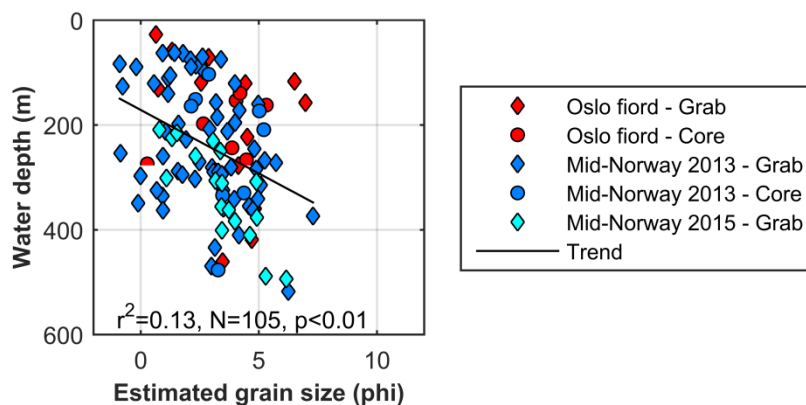
Beregninger viser at det er praktisk talt ingen korrelasjon ($r^2 = 0.03$) mellom vandndyp og bunnreflektivitet for 202 av stasjonene (figur 5.7). Det er derimot korrelasjon mellom vandndyp og estimert kornstørrelse (figur 5.8), selv om denne er moderat ($r^2 = 0.13$). Retningen er som forventet; antatt finere sedimenter korrelerer positivt med økende vandndypdybde.



Figur 5.7 Bunnreflektivitet versus vandndyp.

Dersom overflatesediment kan estimeres basert på akustiske data, kan det gi store økonomiske gevinster i form av færre prøvetakinger av havbunnen. Korrelasjonen mellom estimert kornstørrelse og bunnprøver fra Oslofjorden og Trøndelagskysten vises i figur 5.9. Korrelasjonen er sterk mellom målt og estimert kornstørrelse ($r^2=0.36$), og noe sterkere enn

mellom andel sand og estimert kornstørrelse ($r^2=0.23$, ikke vist i figuren). Korrelasjonen er også sterk mellom andel sand/grus og estimert kornstørrelse ($r^2=0.39$). Estimert kornstørrelse er gjennomgående grovere (lavere ϕ -verdi) enn målt kornstørrelse. Det ønskelige var et 1:1-forhold mellom disse to størrelsene og mulige forklaringer på avviket diskuteres i kapittel 6. I figur 5.9 sees tydelig at estimert kornstørrelse begrenses av øvre og nedre grense i FMGTo for enkelte stasjoner.

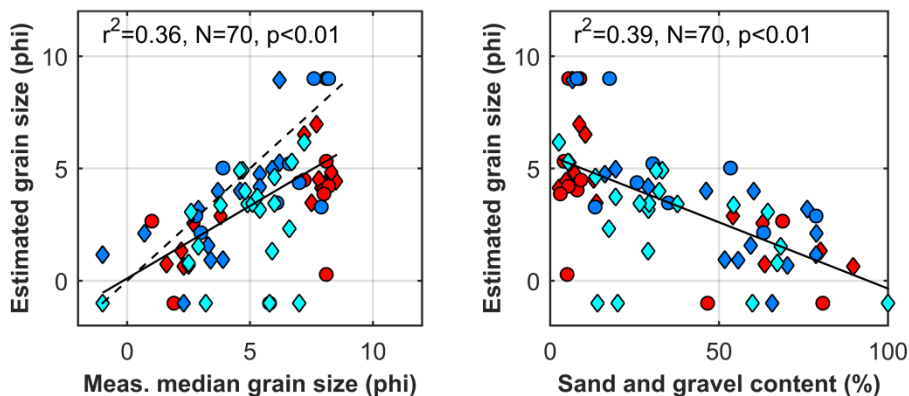


Figur 5.8 Korrelasjon mellom estimert kornstørrelse og vandndyp. Prøver fra Nordsjøen er flagget ut. I tillegg er stasjoner med estimert kornstørrelse lik -1ϕ og større enn 8.8ϕ flagget ut.

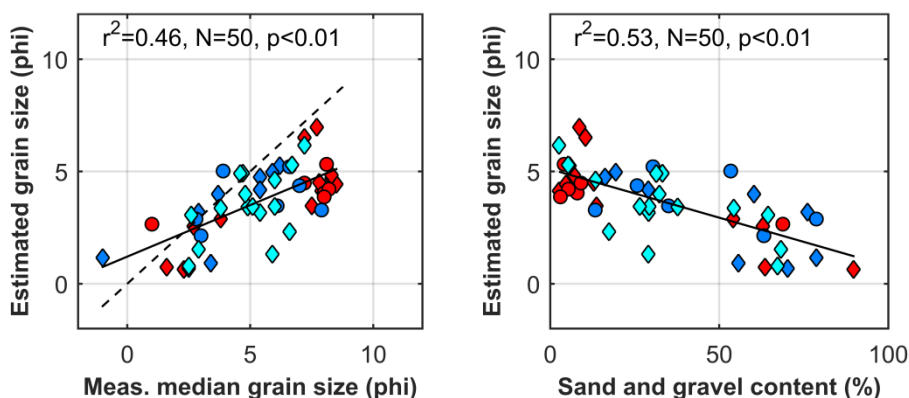
Når alle stasjoner flagges ut der standardavviket i bunnreflektivitet er større enn 2.5 dB i et sirkulært område med radius 100 m, øker korrelasjonen. Stort standardavvik i bunnreflektivitet indikerer stor variasjon i sediment-forholdene. Små feil i posisjonering kan ha stor betydning og derfor forsvare at slike stasjoner flagges ut. Når i tillegg stasjoner med estimert kornstørrelse lik -1ϕ og større enn 8.8ϕ flagges ut, bedres korrelasjonen ytterligere (figur 5.10). Korrelasjonen mellom andel sand/grus og estimert kornstørrelse øker fra $r^2 = 0.39$ til $r^2 = 0.53$ (tabell 5.1). Korrelasjonen mellom målt og estimert kornstørrelse øker tilsvarende (fra $r^2 = 0.36$ til $r^2 = 0.46$). Resultatene diskuteres i kapittel 7.1.

Ved lineær regresjonsanalyse finnes at

$$M^{\text{EST}}(\phi) = 1.240 + 0.454M^{\text{MEAS}}(\phi). \quad (5.1)$$



Figur 5.9 Estimert kornstørrelse som funksjon av målt kornstørrelse og andel sand/grus. Den stiplede linjen viser 1:1-forhold mellom estimert og målt kornstørrelse. FMGTos terskel for laveste estimerte kornstørrelse (-1ϕ) vises tydelig.

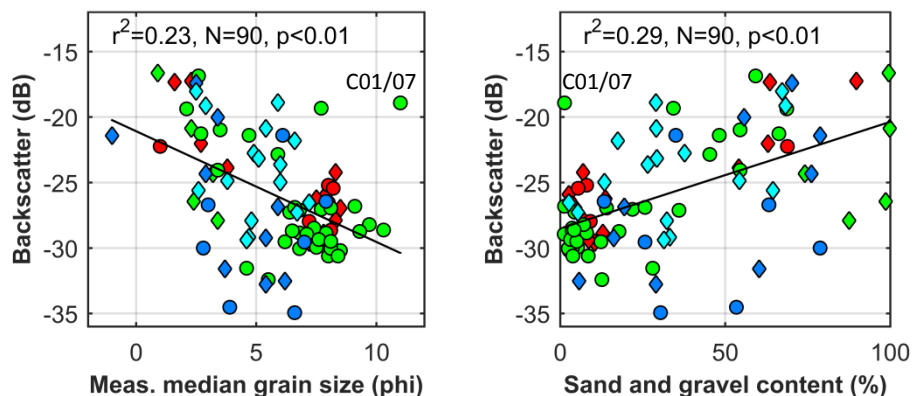


Figur 5.10 Estimert kornstørrelse som funksjon av målt kornstørrelse og andel sand/grus. Hvilke stasjoner som er flagget ut, beskrives i teksten.

Bunnreflektiviteten avtar som forventet med økende kornstørrelse i ϕ -enhet. Jo grovere sedimenter, jo kraftigere tilbakespredning. Korrelasjonen er likevel bare middels sterk med r^2 mellom 0.2 og 0.3. Når de samme kriteriene benyttes for å flagge ut data som i forrige avsnitt, bedres korrelasjonen minimalt (figur 5.11 og tabell 5.1).

Sedimentkjerne C01/07 fra Nordsjøen skiller seg ut i figur 5.11 med middels høy bunnreflektivitet (-18.9 ± 0.8 dB), høy målt kornstørrelse (11.0ϕ) og minimalt med sand/grus (kun 1.3 %). Sedimentprøven er tatt på rundt 450 m dyp, i en grop som er 4 km bred og 20 km lang, nær kysten. Helningen er på 1° . Gropen vises overraskende nok ikke i kartet over bunnreflektivitet. I området rundt er det høy bunnreflektivitet. De akustiske dataene er tatt opp med EM 1002, og derfor ikke like pålitelige som EM 710-data. Når denne stasjonen flagges ut øker korrelasjonen mellom målt kornstørrelse og bunnreflektivitet fra $r^2 = 0.23$ til $r^2 = 0.29$. Mellom andel sand/grus og bunnreflektivitet øker korrelasjonen fra $r^2 = 0.29$ til $r^2 = 0.32$.

Både for estimert kornstørrelse og bunnreflektivitet varierer korrelasjonen med geografisk område (tabell 5.1). Dårligst korrelasjon er det på Trøndelagskysten. Generelt er det høy korrelasjon i Oslofjorden, og best samsvar oppnås mellom andel sand/grus og bunnreflektivitet i Oslofjorden ($r^2 = 0.72$).



Figur 5.11 Bunnreflektivitet som funksjon av målt kornstørrelse og andel sand/grus. Hvilke stasjoner som er flagget ut, er beskrevet i teksten.

Parameterpar	O	N	T13	T15	O(N)T
Andel sand/grus (%) – bunnreflektivitet (dB)	0.72	0.43	0.12	0.16	0.29
Andel sand/grus (%) – estimert kornstørrelse (ϕ)	0.65	–	0.47	0.44	0.53
Målt kornstørrelse (ϕ) – estimert kornstørrelse (ϕ)	0.59	–	0.46	0.28	0.46
Målt kornstørrelse (ϕ) – bunnreflektivitet (dB)	0.66	0.27	0.18	0.05	0.23
Antall prøver	18	40	16	16	

Tabell 5.1 Pearsons korrelasjonskoeffisient kvadrert (r^2) mellom akustiske og fysiske parametre fra Oslofjorden, Nordsjøen, Trøndelagskysten 2013 og Trøndelagskysten 2015. Estimert kornstørrelse for stasjoner i Nordsjøen er ikke med i datagrunnlaget.

5.4 Analyse av datapunkter som tidligere er flagget ut

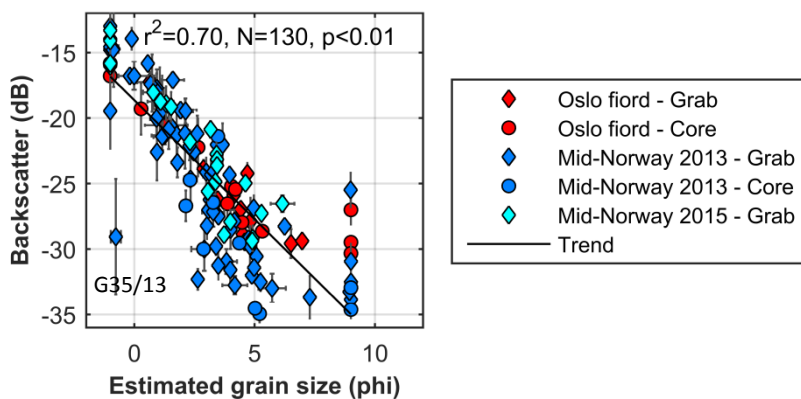
Avvikende datapunkter kan gi informasjon om begrensinger i FMGT₀ og utfordringer ved produksjonen av bunnkart basert på MBES-data. I figur 5.6 som viser bunnreflektivitet versus estimert kornstørrelse, har vi flagget ut 26 av 130 stasjoner i Oslofjorden og på Trøndelagskysten (ti stasjoner med $M^{\text{EST}} > 8.8\phi$, 15 stasjoner med $M^{\text{EST}} = -1\phi$ og stasjonen G35/13 på Trøndelagskysten). I figur 5.12 er disse inkludert i datagrunnlaget. Korrelasjonen er like sterk ($r^2 = 0.70$), men det er tydelig at yttergrensene for estimert kornstørrelse satt i FMGT₀ nåes for en del stasjoner. Det er dessuten påtakelig at svært få stasjoner har estimerte kornstørrelse mellom 7 og 9 ϕ . Det kan se ut som om algoritmen i FMGT₀ som estimerer kornstørrelse basert på bunnreflektivitet, ikke fungerer optimalt for visse sedimenttyper.

I kapittel 5.4.1– 5.4.3 undersøkes de 26 stasjonene nærmere. I kapittel 5.4.4 og 5.4.5 ser vi nærmere på henholdsvis prøver fra Nordsjøen og bimodale sedimentprøver. I kapittel 5.4.6 er det stasjoner med stort standardavvik i bunnreflektivitet som undersøkes.

5.4.1 Estimert kornstørrelse lik -1ϕ

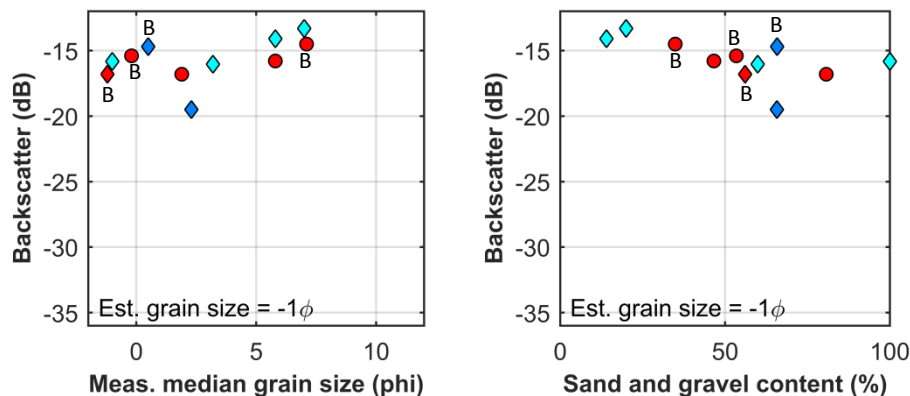
Totalt 19 av 151 stasjoner har estimert kornstørrelse lik -1ϕ . Foruten de 15 stasjonene i figur 5.12 gjelder dette fire stasjoner med bimodale sedimentprøver. Resultatene for de 19 stasjonene kan oppsummeres som følger:

- Fotografier av grabbprøver viser grovkornet overflate, og beskrivelser notert på tokt passer med dette
- Grabbprøvene har steiner i overflaten³⁹
- Både nivået på bunnreflektivitet (alle 19 stasjonene har bunnreflektivitet høyere enn -20 dB) og estimert kornstørrelse lik -1ϕ gjenspeiler grovkornet overflate
- Sedimentlaget under overflaten kan bestå av finkornede og/eller grovkornede sedimenter uten at dette gir markante utslag på bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse.
- Fra 11 av de 19 stasjonene med estimert kornstørrelse lik -1ϕ , er det tatt sedimentprøver. Målt kornstørrelse for disse varierer fra -1.2 til 7.1ϕ (-1.0 til 7.0ϕ for ikke-bimodale prøver), og andel sand/grus varierer fra 14 til 100 % (figur 5.13). Den store variasjonen er mest sannsynlig koblet til hvor utsnittene av sedimentprøvene ble foretatt.



Figur 5.12 Estimert kornstørrelse versus estimert bunnreflektivitet for 130 stasjoner (med ett standardavvik markert). Figuren inkluderer 26 stasjoner som er flagget ut i figur 5.6.

³⁹ Stein har kornstørrelse grovere enn terskelen i FMGTo som er på -1ϕ (2 mm i diameter).



Figur 5.13 Bunnreflektivitet for 11 stasjoner med estimert kornstørrelse lik -1ϕ , som funksjon av målt kornstørrelse (t.v.) og andel sand og grus (t.h.). Fire bimodale sedimentprøver er inkludert (B). Eksakt snittdybde for grabbprøvene er ukjent.

5.4.1.1 Beskrivelse av prøver med målt kornstørrelse $< 5\phi$ og estimert kornstørrelse lik -1ϕ

Syv av de 11 sedimentprøvene med estimert kornstørrelse lik -1ϕ har målt kornstørrelse $< 5\phi$. Felles for de fem tilhørende grabbprøvene er grove sedimenter både på overflaten (figur 5.14) og i et eventuelt sedimentlag under:

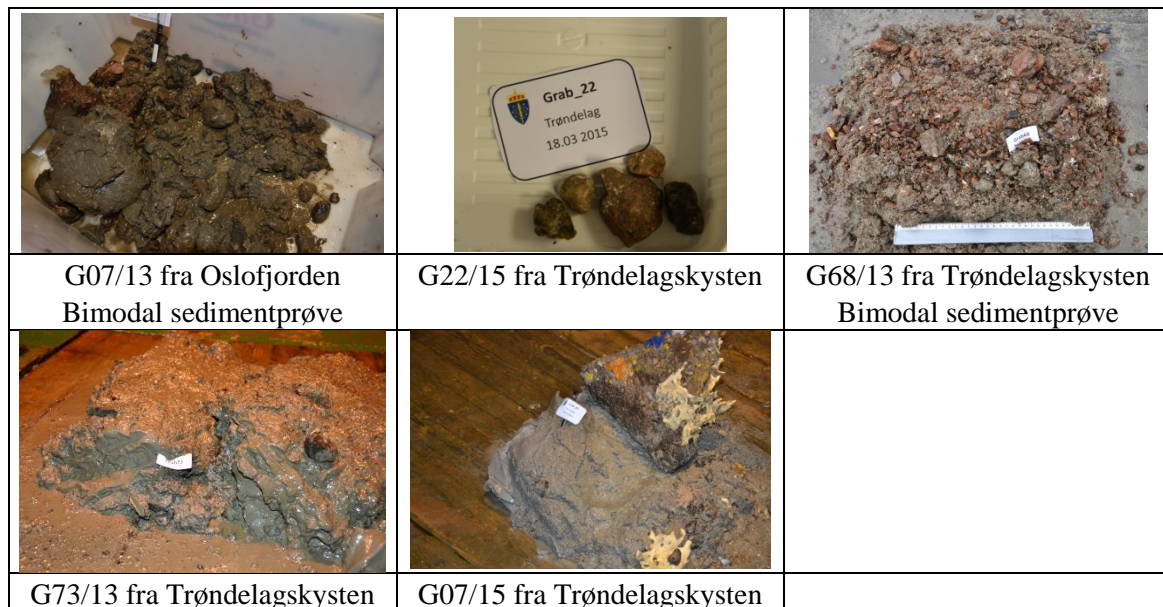
- G07/13 (BS = -16.8 dB, $Md^{MEAS} = -1.2\phi$) fra Oslofjorden beskrives som å bestå av steiner og grus i sandholdig slam, den største steinen var på ca. 15 cm, to sjøpølser, biologisk materiale og små skjell.
- G22/15 (BS = -15.8 dB, $Md^{MEAS} = -1.0\phi$) fra Trøndelagskysten bestod av kun steiner og grus og ble ikke sendt til analyse. Mediankornstørrelsen ble satt til -1ϕ , men var strengt tatt nærmere -5ϕ .
- G68/13 (BS = -14.7 dB, $Md^{MEAS} = 0.5\phi$) fra Trøndelagskysten beskrives å ha et 3 cm tykt overflatelag som er grusholdig, med steiner opptil 8 cm, en sjøpølse og planter (se fotografi av prøven i figur 5.14). Sedimentlaget under består av grusholdig, slamholdig sand.
- G73/13 (BS = -19.5 dB, $Md^{MEAS} = 2.3\phi$) fra Trøndelagskysten beskrives å ha et 2 cm tykk grusholdig overflate med en stein opptil 15 cm, noe skjell og skjellfragmenter, mark. Sedimentlaget under består av grusholdig, sandholdig slam med noe skjell og skjellfragmenter, mye stein.
- G07/15 (BS = -16.0 dB, $Md^{MEAS} = 3.2\phi$) fra Trøndelagskysten beskrives å ha en 7 cm tykk overflate av sand og slam, med en stein på 15 cm. Sandkornene er tydelig på fotografiet av prøven (figur 5.14). Sedimentlaget under består av slam med færre enn fem steiner.

De to siste sedimentprøvene med målt kornstørrelse $< 5\phi$ kommer fra sedimentkjernene C02/13 og C13/13 fra Oslofjorden hvis lag ikke er beskrevet i analyserapportene.

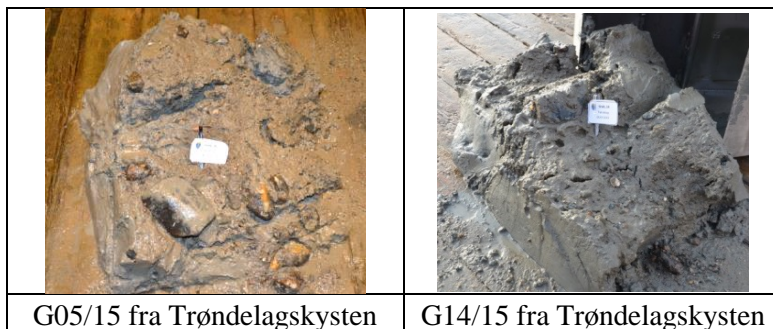
5.4.1.2 Beskrivelse av prøver med målt kornstørrelse > 5φ og estimert kornstørrelse lik -1φ

Fire av de 11 sedimentprøvene med estimert kornstørrelse lik -1φ har målt kornstørrelse > 5φ, som er vesentlig finere enn estimert kornstørrelse. To av prøvene er fra sedimentkjerner og to fra grabbprøver. Beskrivelse av overflatelagene passer både med høy bunnreflektivitet (> -20 dB) og lav estimert kornstørrelse (-1φ). Det er tydelig at det finkornige sedimentlaget under som består av silt og leir har liten betydning på de akustiske egenskapene som er undersøkt:

- Øverste utsnitt av sedimentkjerne C11/13 (BS = -14.5 dB) fra Oslofjorden ble tatt 2–4 cm nedenfor toppen med målt kornstørrelse $Md^{MEAS} = 7.1\phi$ (fin silt). Det øverste laget i sedimentkjernen ble ved prøvetaking beskrevet å bestå av “grov sand/fin grus.
- Utsnitt av sedimentkjerne C09/13 (BS = -15.4 dB) fra Oslofjorden ble tatt 2–4 cm nedenfor toppen med målt kornstørrelse $Md^{MEAS} = 5.8\phi$ (medium silt). Det lå mye sand på utsiden av røret da prøven ble trukket opp av sjøen, men noe nærmere beskrivelse av overflatelaget finnes ikke. Sedimenttettheten der utsnittet ble tatt fra var ca. 1.7 g/cm^3 , noe som indikerer sand og ikke medium silt som i sedimentprøven.
- Grabbprøve G05/15 (BS = -14.1 dB, $Md^{MEAS} = 5.8\phi$) fra Trøndelagskysten beskrives å ha en 5 cm tykk overflate av sand og grus, steiner og noe skjell og biologisk materiale (se også fotografi av grabbprøven i figur 5.15). Sedimentlaget under består av slam.
- Grabbprøve G14/15 (BS = -13.3 dB, $Md^{MEAS} = 7.0\phi$) fra Trøndelagskysten beskrives å ha et 2–3 cm tykt overflatelag av grus og sand med 5–10 steiner større enn 6 cm (figur 5.15); sedimentlaget under består av sandholdig leir.



Figur 5.14 Fotografier av grabbprøver tatt på tokt med målt kornstørrelse < 5φ, og estimert kornstørrelse lik -1φ.



Figur 5.15 Fotografier av grabbprøver tatt på tokt med målt kornstørrelse $> 5\phi$, og estimert kornstørrelse lik -1ϕ . En stor stein som er til dels overdekt av slam sees i G14/15; grus sees nede til høyre i fotografiet.

5.4.1.3 Prøver der kornstørrelse ikke ble målt – fra stasjoner med est. kornstørrelse lik -1ϕ

Ved de resterende åtte av de 19 stasjonene ble det tatt grabbprøver som ikke er analysert for kornstørrelsesfordeling. Fotografier av disse viser tydelige grove overflater med stein og grus (figur 5.16).

5.4.2 Estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$

Ti av de 26 stasjonene i figur 5.12 har estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$. Resultatene for de ti stasjonene kan oppsummeres som følger:

- Fotografier av grabbprøver viser finkornige sjøbunnsedimenter (slam), og beskrivelsene notert på tokt bekrefter dette
- Bunnreflektiviteten varierer mye av ukjent årsak, fra -34.6 til -25.5 dB
- Målt kornstørrelse er mellom 6.2 og 8.2ϕ for de seks sedimentprøvene som er analysert for kornstørrelsesfordeling (figur 5.17). Dette er litt lavere (grovere) enn estimert kornstørrelse. For stasjoner med estimert kornstørrelse mellom -1 og 8.8ϕ er målt kornstørrelse gjennomgående høyere i ϕ -enhet (finere) enn estimert kornstørrelse, altså motsatt resultat.
- Små mengder grove korn påvirker bunnreflektivitet, men ikke estimert kornstørrelse
- Slaminnholdet er over 82 % for sedimentprøvene som er analysert

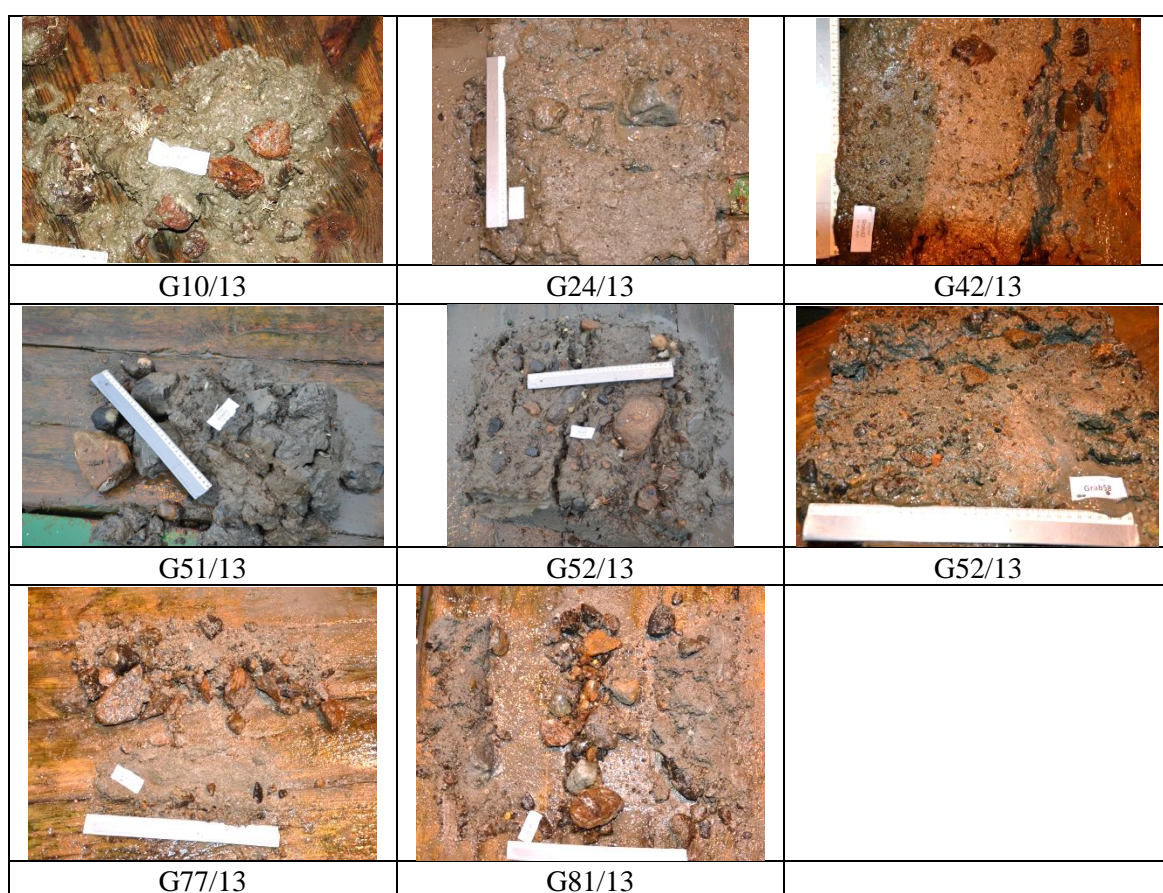
Nedenfor undersøkes de seks stasjonene hvis sedimentprøver er analysert for kornstørrelse nærmere.

5.4.2.1 Prøver fra stasjoner med bunnreflektivitet > -30 dB og estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$

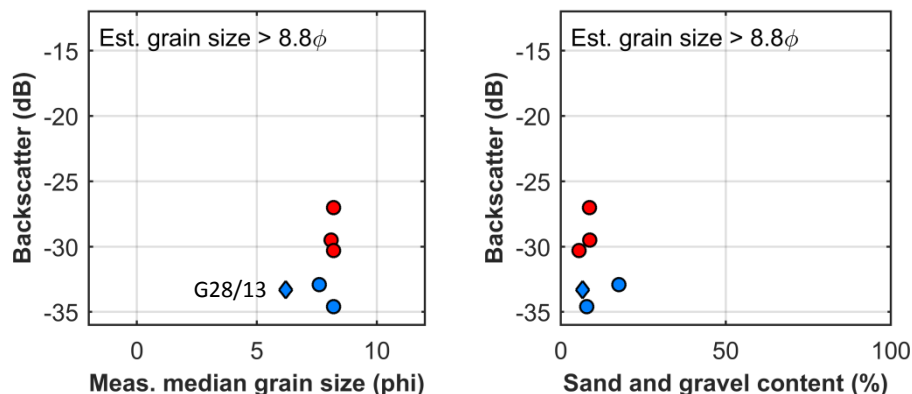
Tre av stasjonene med estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$ har bunnreflektivitet > -30 dB som er høyere enn forventet. Ved disse ble det tatt sedimentkjerner⁴⁰, og de tre tilhørende sedimentprøvene har 0 % grus og maksimum 8.8 % sand. Utsnittet fra C04/13 er klassifisert

⁴⁰ C01/13, C04/13 og C06/13 i Oslofjorden.

som slam med målt kornstørrelse 8.2ϕ . Midlere lydshastighet i kjernen er 1440 ± 11 m/s, og bekrefter finkornede sedimenter. Stasjonen ligger på 103 m dyp i et område med noe variasjon i bunnreflektivitet innenfor 100 m radius (standardavvik 1.1 dB), og stor variasjon innenfor 500 m radius selv om det er relativt flatt i området. Utsnitt fra de to andre kjerneprøvene har også målt kornstørrelse på rundt 8ϕ . Både stasjon C01/13 og stasjon C06/13 ligger i flatt terreng, førstnevnte på 488 m dyp, sistnevnte på 105 m dyp – med noe variasjon i bunnreflektivitet innenfor 500 m radius. Sedimentkjernene har midlere lydshastighet henholdsvis 1454 ± 7 m/s og 1450 ± 11 m/s, som også tyder på finkornige sedimenter. Midlere tetthet er rundt 1.5 g/cm³. Vi har ingen beskrivelse av overflatelagene, og prøvetakingen ble heller ikke filmet. Muligens ville en grabbprøve gitt svar på hvorfor bunnreflektiviteten er høyere enn forventet utfra sedimenttypen.



Figur 5.16 Fotografier av grabbprøver tatt på tokt langs Trøndelagskysten i 2013. Vi tok ikke sedimentprøve av disse for analyse av kornstørrelsesfordeling. Bunnreflektiviteten i området varierer fra -13 til -16 dB; estimert kornstørrelse er lik -1ϕ for alle stasjonene.



Figur 5.17 Bunnreflektivitet ved estimert kornstørrelse større enn 8.8ϕ . Ingen annen filtrering er gjort på datasettet bestående av 213 prøver.

5.4.2.2 Prøver fra stasjoner med bunnreflektivitet < -30 dB og estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$

Bunnreflektiviteten for de tre resterende sedimentprøvene⁴¹ med estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$ er fra -32.9 til -34.6 dB som samsvarer godt med finkornige sedimenter (se fotografi av G28/13 i figur 5.18). Øverste lag i de to sedimentkjernene er beskrevet som leir og siltholdig leir (begge med skjellfragmenter); grabbprøven er beskrevet å bestå av slam (sandholdig?), olivengrå, homogen, noen få skjellfragmenter, noen flerbørstemark⁴². Selv med skjellfragmenter i overflaten blir bunnreflektiviteten lavere enn -30 dB. Alle tre stasjonene ligger i flatt terreng med lite endring i bunnreflektivitet innenfor 500 m radius. Målt vanddybde spenner fra 198 til 240 m. Målt kornstørrelse er henholdsvis 6.2, 8.2 og 7.6φ.

5.4.2.3 Prøver der kornstørrelse ikke ble målt – fra stasjoner med est. kornstørrelse $> 8.8\phi$

Ved fire⁴³ av de ti stasjonene med estimert kornstørrelse $> 8.8\phi$ ble det ikke tatt sedimentprøve, og derfor vises ikke disse i figur 5.17. Tre av prøvene har bunnreflektivitet mellom -31 og -34 dB. Rudimentær analyse på tokt beskriver den ene prøven som sandholdig slam; de to andre beskrives som massiv slam med noe eller ingen skjell og skjellfragmenter, noe eller ingen flerbørstemark (figur 5.18). Den siste av de fire stasjonene skiller seg ut i figur 5.12 (G71/13 på Trøndelagskysten) med estimert kornstørrelse 9ϕ og bunnreflektivitet -25.5 dB som er veldig høyt i forhold til den estimerte kornstørrelsen. Grabbprøven som er tatt ved denne stasjonen er beskrevet å bestå av brunaktig slam på overflaten og massivt, mykt slam i sedimentet under. Sediment bestående av slam passer svært godt med den høye verdien for estimert kornstørrelse i φ-enhet, men ikke så godt med verdien for bunnreflektivitet. Fotografi av prøven viser heller ikke annet enn slam. I følge dybdekartet ligger stasjon G71/13 nedenfor en skråning på rundt 450 m dyp. Omtrent 100 m sørvest er bunnreflektiviteten rundt -31 dB, som passer bedre med sedimentprøven som ble analysert. Muligens påvirker skråningen målt bunnreflektivitet. En annen mulighet er unøyaktighet i posisjonering av stasjonen.

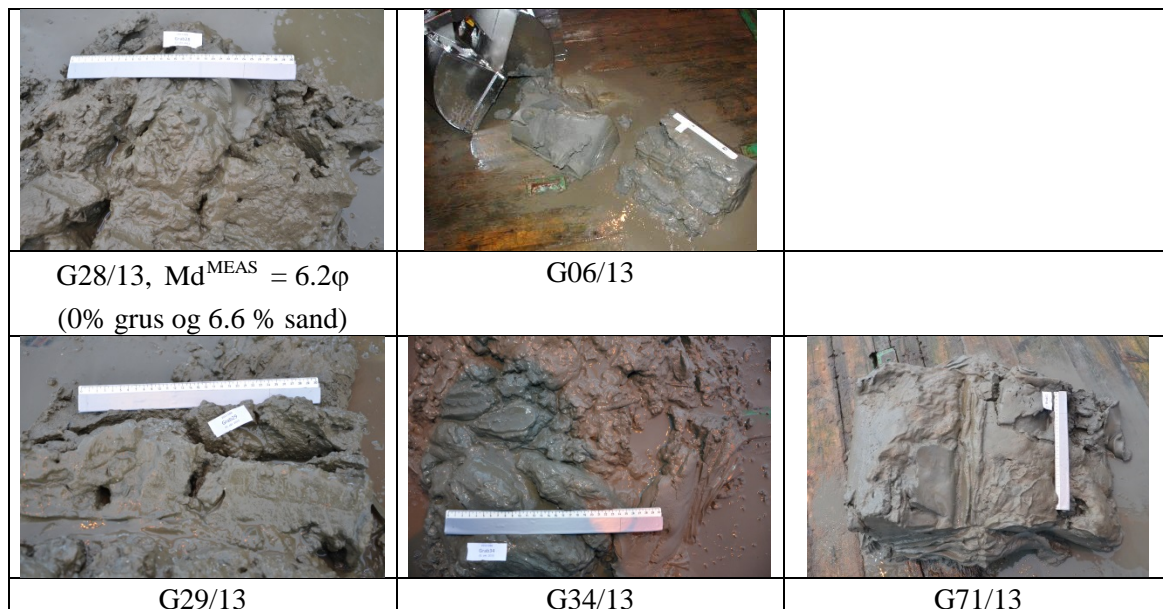
⁴¹ G28/13, C01/13 og C13/13 fra Trøndelagskysten 2013

⁴² Flerbørstemark lever på havbunnen og kan bli fra noen millimeter til flere centimeter lange. De hører til klassen leddormer og det vitenskapelige navnet er polychaeta (SNL, 2016).

⁴³ G06/13, G29/13, G34/13 og G71/13 fra Trøndelagskysten

5.4.3 Stasjon G35/13 fra Trøndelagskysten

Stasjon G35/13 skiller seg vesentlig ut med lav bunnreflektivitet (-29.1 dB) og lav estimert kornstørrelse (-0.8ϕ) i figur 5.12, noe som kan synes motstridende. Standardavvikene er henholdsvis 4.4 dB og 0.2ϕ . Grabbprøven som er tatt ved denne stasjonen viser et 2 cm tykt overflatelag med slamholdig sand over et sedimentlag av massiv grusholdig sand med skjellfragmenter. Fotografier av prøven viser tydelig grovkorn (figur 5.19). Den lave bunnreflektiviteten stemmer med beskrivelsen av det tynne overflatelaget, mens estimert kornstørrelse stemmer overens med beskrivelsen av sedimentlaget under, hvilket viser kompleksiteten i analysene av bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse for stasjoner som har et tynt overflatelag med en finere kornstørrelse enn sedimentet under. Det ble dessverre ikke tatt sedimentprøve for analyse av kornstørrelsesfordeling ved denne stasjonen.



Figur 5.18 Fotografier av grabbprøver tatt på tokt. Alle er fra Trøndelagskysten 2013. Estimert kornstørrelse for stasjonene er mellom 8.8 og 9ϕ , og det ble tatt sedimentprøve for analyse av kornfordeling fra kun G28/13.

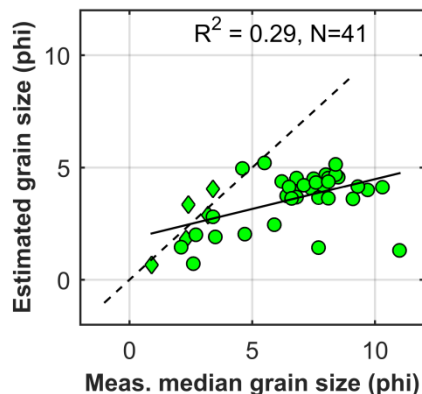


Figur 5.19 Fotografi av grabbprøve fra en stasjon der estimert kornstørrelse og bunnreflektivitet fra FMGTo gir tilsynelatende motstridende informasjon.

5.4.4 Stasjoner i Nordsjøen

Estimert kornstørrelse for stasjoner i Nordsjøen flagges ut fordi verdiene er funnet indirekte basert på bunnreflektivitet som tidligere nevnt og ikke ved prosessering i FMGTo.

Korrelasjonen mellom målt og estimert kornstørrelse er dog middels sterk ($r^2 = 0.29$). Jevnt over er estimert kornstørrelse grovere enn målt (lavere ϕ -verdi).



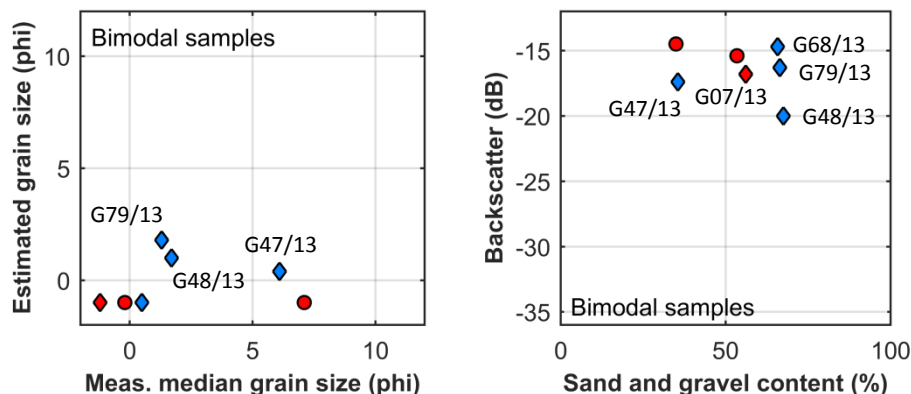
Figur 5.20 Estimert kornstørrelse for stasjoner i Nordsjøen basert på forholdet mellom bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse fra Oslofjorden og Trøndelagskysten.

5.4.5 Bimodale sedimentprøver

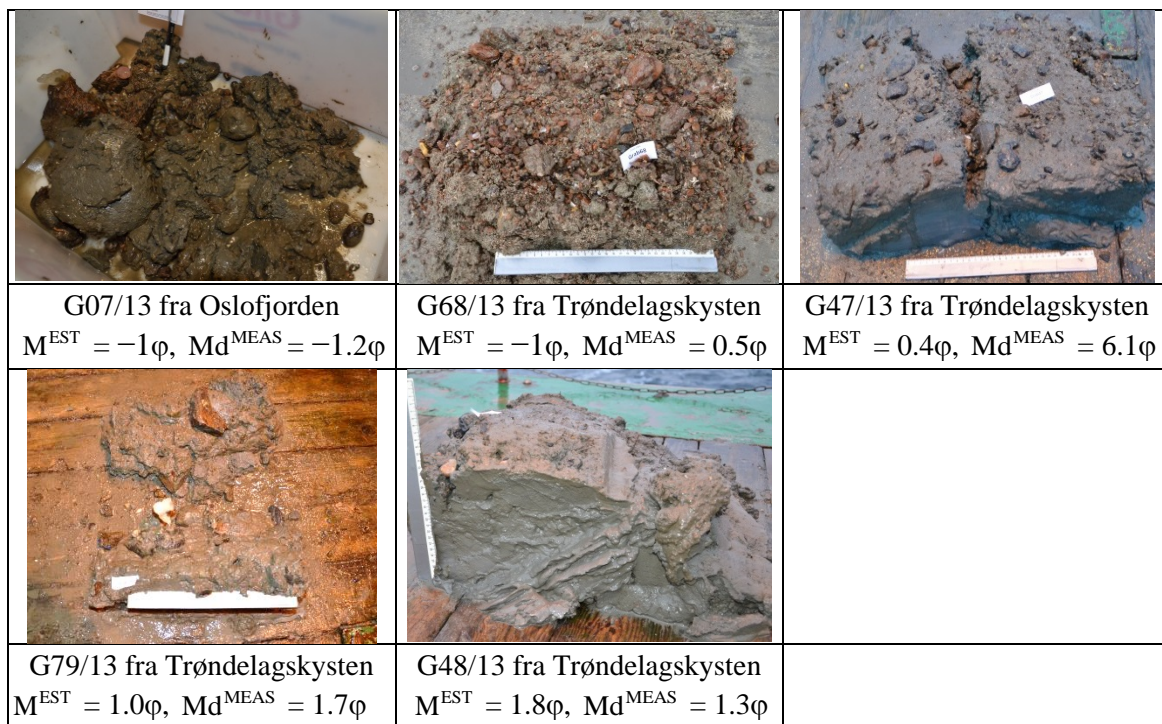
Bimodale sedimentprøver har bunnreflektivitet fra -20 dB og høyere, andelen sand/grus varierer fra 35 til 68 %, estimert kornstørrelse er mellom -1 til 2ϕ , mens målt kornstørrelse varierer fra -1 til 7.1ϕ for de syv prøvene som dette gjelder (figur 5.21). Bimodale prøver flagges som regel ut i studien siden målt mediankornstørrelse er et dårlig mål på kornfordelingen i slike prøver. Fotografier av grabbprøvene hvis sedimentprøver er bimodale, viser alle grus og mindre stein på overflaten (figur 5.22). Estimert kornstørrelse samsvarer med overflatelaget, mens målt kornstørrelse tydelig avhenger av snittdybden. Grabbprøve G48/13 som på fotografiet ser ut til å ha minst stein, har lavest bunnreflektivitet med -20 dB.

5.4.6 Høyt standardavvik i bunnreflektivitet

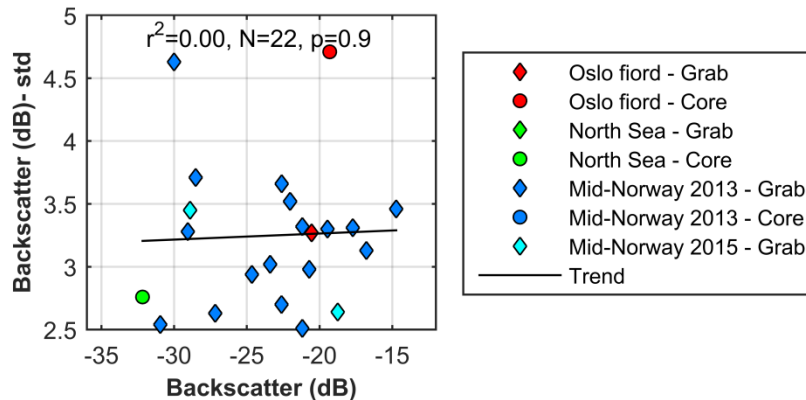
Totalt 22 av 202 stasjoner med MBES-data har høyt standardavvik i bunnreflektivitet (> 2.5 dB innenfor et sirkulært område med radius 100 m). Hele 19 av de 22 stasjonene ligger stasjonene på Trøndelagskysten, og utgjør 17 % av det totale antall stasjoner i dette havområdet (figur 5.23). Standardavviket er ikke korrelert med nivået på bunnreflektivitet ($r^2 = 0.0$, $p = 0.9$). Det er heller ikke funnet noen korrelasjon mellom høyt standardavvik for bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse, standardavvik for estimert kornstørrelse, målt kornstørrelse, dybde, andel slam, andel sand eller andel sand/grus.



Figur 5.21 Bunnreflektivitet, andel sand/grus, estimert og målt mediankornstørrelse for bimodale sedimentprøver. Ingen annen filtrering er gjort på datasettet bestående av 217 sedimentprøver annet enn at andelene grus og slam er større enn andelen sand.



Figur 5.22 Fotografier av grabbprøver hvis sedimentprøver er bimodale. Vi har ikke bilde av de bimodale sedimentprøvene fra kjernene C11/13 og C13/13 fra Oslofjorden. Fra G47/13 ble det tatt to sedimentprøver (A og B); den nederste (B) er unimodal med målt kornstørrelse 6.9 ϕ .









Figur 5.23 Stasjoner med standardavvik i bunnreflektivitet over 2.5 dB i et område med radius 100 m rundt hver bunnprøvestasjon. Stasjon C14/13 omtales i kapittel 5.5.

5.5 Analyse av grabbprøver fra Oslofjorden og Trøndelagskysten med estimert kornstørrelse tilsvarende grov silt og grov sand




Til sammen 18 stasjoner fra Oslofjorden og Trøndelagskysten har estimert kornstørrelse mellom 4 og 5 ϕ (grov silt). Figur 5.24 viser fotografier av grabbprøver fra noen av disse. Fargen varierer fra grå, olivengrå og brun⁴⁴. Målt kornstørrelse for sedimentprøver fra de 18 stasjonene (alle unimodale) varierer fra 3.7 til 8.5 ϕ , med et gjennomsnitt på $6.4 \pm 1.7\phi$. Estimert kornstørrelse er med andre ord i gjennomsnitt ca. 2 ϕ lavere enn målt. Andel sand varierer fra mye, fra 2 til 60 %. Gjennomsnittlig sandinnhold er lik 21 ± 18 %. Gjennomsnittlig grusinnhold er lik 0.1 % og alle prøvene har mindre enn 1 % grus.

Ni stasjoner fra Oslofjorden og Trøndelagskysten, har estimert kornstørrelse mellom 0 og 1 ϕ (grov sand). Sedimentprøvene fra syv av disse er unimodale. Andel grus i sedimentprøvene fra seks av stasjonene varierer fra 0 til 27 %, med et gjennomsnitt på 13 ± 11 %. Andel sand varierer fra 34 til 89 %, med et gjennomsnitt på 53 ± 21 %. Målt kornstørrelse varierer fra 1.6 til 3.9 ϕ , med et gjennomsnitt på $2.7 \pm 0.8\phi$. Også her er estimert kornstørrelse i gjennomsnitt ca. 2 ϕ lavere enn målt. Utfra fotografiene av grabbprøvene ser vi at kornstørrelsesfordeling i sedimentprøvene vil være svært avhengig av snittybden. Den syvende unimodale prøven (utsnitt av C14/13 fra Oslofjorden), avviker med 95 % slam i sedimentprøven, men siden stasjonen har stor variasjon i bunnreflektivitet (4.7 dB ved midling over et sirkulært område med radius 100 m, se figur 5.23) tyder det på heterogene bunnforhold i nærområdet.

⁴⁴ Fargene blir feil på bilder tatt om natten.

		
G19/15 fra Trøndelagskysten $M^{EST} = 4.9\phi$, $Md^{MEAS} = 4.6\phi$ (31 % sand)	G06/15 fra Trøndelagskysten $M^{EST} = 4.6\phi$, $Md^{MEAS} = 6.0\phi$ (13 % sand)	G06/13 fra Oslofjorden $M^{EST} = 4.5\phi$, $Md^{MEAS} = 7.8\phi$ (13 % sand)
		
G45/13 fra Trøndelagskysten $M^{EST} = 5.0\phi$, $Md^{MEAS} = 5.9\phi$ (19 % sand)	G16/13 fra Trøndelagskysten $M^{EST} = 4.7\phi$, $Md^{MEAS} = 5.4\phi$ (16 % sand)	G08/13 fra Oslofjorden $M^{EST} = 4.8\phi$, $Md^{MEAS} = 8.3\phi$ (7 % sand)

Figur 5.24 Fotografier av grabbprøver tatt på tokt med estimert kornstørrelse mellom 4 og 5 ϕ (grov silt). Andel sand i sedimentprøven er oppgitt i tillegg til målt mediankornstørrelse, og estimert kornstørrelse ved stasjonen.

		
G13/13 fra Oslofjorden $M^{EST} = 0.7\phi$, $Md^{MEAS} = 1.6\phi$ (27 % grus og 36 % sand)	G12/15 fra Trøndelagskysten $M^{EST} = 0.8\phi$, $Md^{MEAS} = 2.5\phi$ (20 % grus og 47 % sand)	G08/13 fra Trøndelagskysten $M^{EST} = 0.9\phi$, $Md^{MEAS} = 3.9\phi$ (3 % grus og 49 % sand)

Figur 5.25 Fotografier av grabbprøver tatt på tokt med estimert kornstørrelse mellom 0 og 1 ϕ (grov sand). Andel sand og grus i sedimentprøven er oppgitt i tillegg til målt mediankornstørrelse, og estimert kornstørrelse ved stasjonen.

5.6 Rudimentære analyseresultater og akustiske parametre

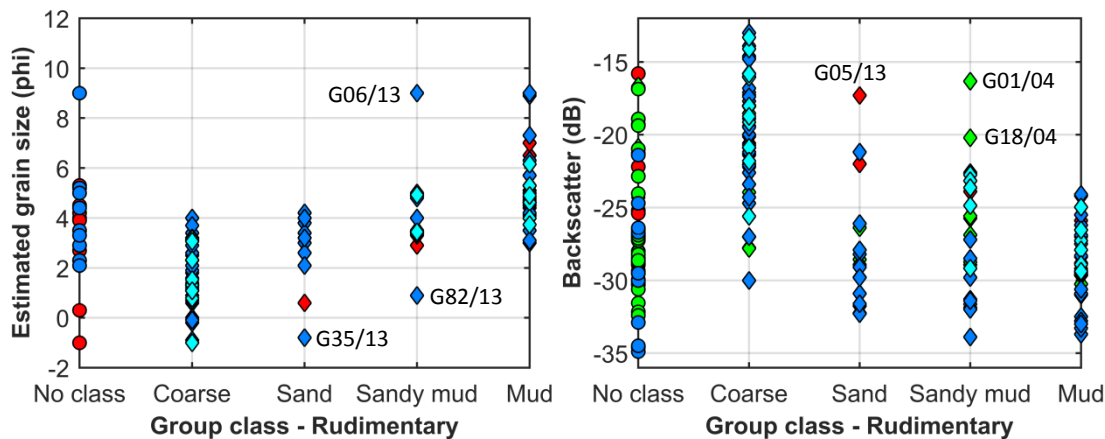
Estimert kornstørrelse, bunnreflektivitet og resultatet av inndeling i sedimentgrupper vises i figur 5.26 og figur 5.27. For stasjoner med bunnprøver klassifisert som slam ligger estimert kornstørrelse fra 3 til 9 ϕ , og for stasjoner med bunnprøver klassifisert som grove ligger estimatet fra -1 til 4 ϕ . Stasjoner med bunnprøver i gruppene sand og sandholdig slam har estimert kornstørrelse fra -1 til 4-5 ϕ med ett unntak. Medianverdiene er henholdsvis 1, 3, 4 og 5 ϕ . Mellom bunnreflektivitet og sedimentgruppe er det dårlig samsvar. Medianverdiene for de tre fineste sedimentgruppene er alle -29 dB, og det er tydelig ingen forskjeller. For den grovste sedimentgruppen er medianverdien -19 dB. Det er dessuten større spredning når sedimentgruppe sammenstilles med bunnreflektivitet enn med estimert kornstørrelse som vist i boks-plottet.

For enkelte prøver indikerer resultatet fra prosesseringen i FMGTo et grovere sediment enn vår klassifikasjon på tokt. På tokt har det vært mye fokus på å klassifisere sedimentet som er under overflatelaget og først i den senere tide har overflatelaget systematisk blitt analysert og beskrevet. Uteliggere i figur 5.26 diskuteres derfor nedenfor. Interessant nok er det ikke de samme stasjonene/prøvene som blir uteliggere i plott over estimert kornstørrelse og bunnreflektivitet.

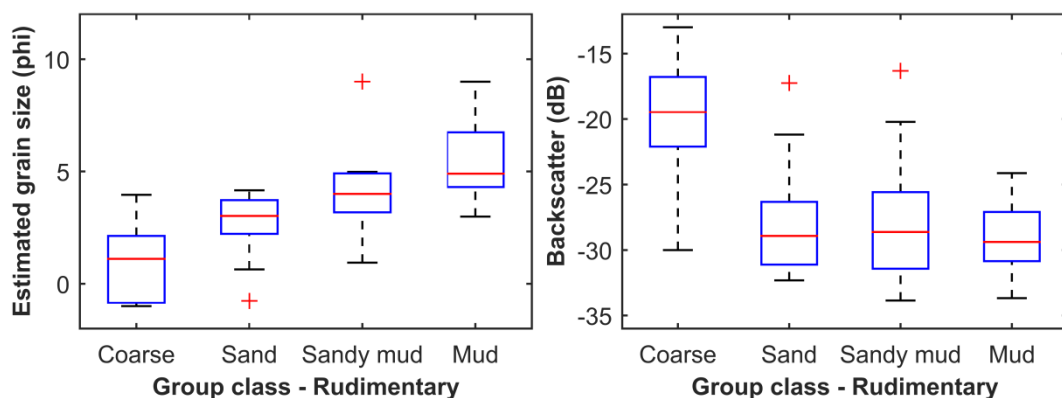
Grabbprøve G06/13 fra Trøndelagskysten ble klassifisert som sandholdig slam på tokt, og skiller seg ut i sin gruppe med estimert kornstørrelse 9 ϕ . Ved nærmere kikk på fotografiet av grabbprøven ser vi at denne har en myk, brunaktig overflate og ingen skjell (figur 5.18). Dette kan forklare at estimatet for kornstørrelse når maksimumsverdien. Bunnreflektiviteten ved stasjonen er -34 dB som også indikerer svært fine sedimenter. Sandkorn som vi kjente på tokt og som lå bak klassifikasjonen, kommer ikke frem i de akustiske egenskapene som er undersøkt. Det er ikke loggført på hvilken dybde sandkorn ble registrert. Det kan være at sandkornene lå for dypt til å ha effekt på bunnreflektivitet, eller at det var færre enn klassifikasjonen tilsier.

I den andre enden av prøvene klassifisert som sandholdig slam finner vi grabbprøve G82/13 fra Trøndelagskysten med estimert kornstørrelse 0.9 ϕ . Denne har en bunnreflektivitet på -23 dB. Prøven ble tatt med kjerneprøvetakeren, men var så liten at den ble betegnet som en grabbprøve. På bildet sees koraller i det sandholdige slammet og på tokt ble det også notert et stort skjell/skjellfragmenter (figur 5.28). Med andre ord inneholder prøven mye mer enn sandholdig slam, noe som kan forklare både lav estimert kornstørrelse i ϕ -enhet og middels bunnreflektivitet.

Grabbprøve G35/13 fra Trøndelagskysten ble klassifisert som sand og skiller seg ut med estimert kornstørrelse -0.8 ϕ . Denne prøven er flagget ut i andre sammenhenger siden bunnreflektiviteten er svært lav (-29.1 dB) i forhold til den estimerte kornstørrelsen, se nærmere omtale i kapittel 5.4.3.



Figur 5.26 Estimert kornstørrelse og bunnreflektivitet versus sedimentgruppe basert på rudimentær analyse av grabbprøver. Prøver fra Nordsjøen er flagget ut i figuren over estimert kornstørrelse, det samme er bimodale prøver.







Figur 5.27 Boks-plott av estimert kornstørrelse og bunnreflektivitet versus sedimentgruppe basert på rudimentær analyse av grabbprøver. Prøver fra Nordsjøen er flagget ut i figuren over estimert kornstørrelse, det samme er bimodale prøver. Uteliggere vises med røde symboler. Blå, horisontale streker viser 25 % og 75 % kvartilene. Medianverdiene vises som røde streker. Stiplede linjer viser «whiskers» (99.3 % av dataene er innenfor disse ved normalfordeling).

Grabbprøve G05/13 fra Oslofjorden skiller seg ut i sedimentgruppen sand med relativt høy bunnreflektivitet (-17.3 dB). I loggen er det notert skjell, inkludert ett stort på 4 cm (dette sees på figur 5.28). Etter tørking kjentes ikke noe slam. Muligens er det mer skjell i nærheten som gir høyere bunnreflektivitet enn forventet basert på klassifiseringsresultatet.

Grabbprøve G01/04 fra Nordsjøen ble klassifisert som siltholdig leir med mindre sand på tokt, og som sandholdig slam i denne studien hvor bare fire klasser inngår. Reflektivitet på -16 dB er derfor høyt. Dessverre finnes det ikke fotografier av denne prøven som kan bekrefte eller avkrefte klassifikasjonsresultatet.

Grabbprøve G18/04 ble klassifisert som sandholdig-leirholdig silt på tokt, og som sandholdig slam i studien. Reflektivitet på -20 dB er også forholdsvis høyt, men skjellfragmenter i prøven kan forklare dette.

	
G05/13 fra Oslofjorden Sand ($M^{\text{EST}} = 0.6\phi$, $Md^{\text{MEAS}} = 2.3\phi$)	G82/13 fra Trøndelagskysten Sandholdig slam ($M^{\text{EST}} = 0.9\phi$)
	
G35/13 fra Trøndelagskysten Sand ($M^{\text{EST}} = -0.8\phi$)	G18/04 fra Nordsjøen Sandholdig slam ($M^{\text{EST}} = 1.7\phi$)

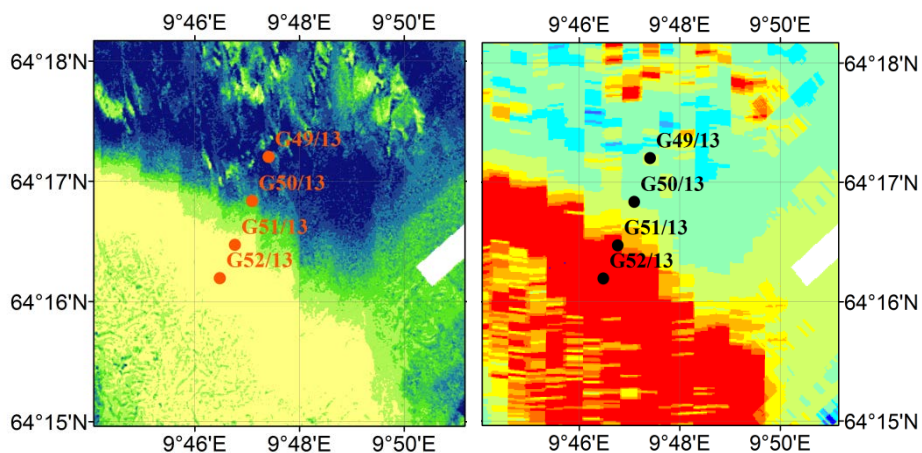
Figur 5.28 Fotografier av grabbprøver som skiller seg ut ved tolkning av rudimentære analyseresultater sammenstilt med estimert kornstørrelse og bunnreflektivitet.

5.7 Fire på rad

Vi tok fire grabbprøver fra fire stasjoner i en skråning langs Trøndelagskysten i 2013, fra dypt til grunt vann, fra lav til høy bunnreflektivitet (figur 5.29). Stasjonene var planlagt i forkant og lå med hensikt nær hverandre for å undersøke overgangen i bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse sammenlignet med grabbprøver fra havbunnen (figur 5.30). Rudimentær analyse ga følgende (fra fin til grov prøve):

- G49/13: Overflate av sandholdig slam med små skjell og muligens gress. Sediment av sandholdig slam med skjellfragmenter, homogen. Klassifisering: Sandholdig slam.
- G50/13: Grusholdig overflate, 1 cm tykkelse. Sediment av sandholdig slam med steiner opptil 13 cm og grovgrus, små skjell, skjellfragmenter, massiv. Klassifisering: Sandholdig slam med stein.
- G51/13: Sediment og overflate av mye grovgrus, seks steiner 8–13 cm, noe skjell og skjellfragmenter, slam litt ned i sedimentet, massiv. Klassifisering: Grusholdig sandholdig slam med stein.

- G52/13: Grusholdig overflate, stein på 13 cm, stein på 8 cm, mye grovgrus. Sediment av grovgrus, noen skjellfragmenter, sone med sandholdig slam, biologisk materiale. Klassifisering: Grusholdig sand.



Figur 5.29 Fire stasjoner på rad. Bunnreflektivitet (t.v.) og estimert kornstørrelse (t.h.)

G49/13 $M^{\text{EST}} = 3.5\phi$, BS = -31.3 dB	G50/13 $M^{\text{EST}} = 4.0\phi$, BS = -24.3 dB
G51/13 $M^{\text{EST}} = -1.0\phi$, BS = -15.8 dB	G52/13 $M^{\text{EST}} = -1.0\phi$, BS = -14.6 dB

Figur 5.30 Fotografier av grabbprøver fra fire stasjoner på rad langs Trøndelagskysten i 2013. Prøvetakingen ble dessverre ikke filmet for disse stasjonene.

Beskrivelsen av G51/13 og G52/13 passer godt overens med høy bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse lik -1ϕ (som er det laveste i FMGT0). Forskjellen i bunnreflektivitet er minimal for disse to stasjonene.

Beskrivelsen og klassifiseringen av G49/13 (sandholdig slam) og G50/13 (sandholdig slam med stein) passer overens med forskjellen i bunnreflektivitet for de to stasjonene (−31.3 dB og −24.3 dB). Overflaten til G49/50 er beskrevet å bestå av sandholdig slam med skjell; overflaten til G50/13 er beskrevet som grusholdig. På fotografiene ser det også ut til at overflaten er grovere for G50/13 enn for G49/13.

Estimert kornstørrelse på 3.5–4φ for G49/13 og G50/13 indikerer veldig fin sand, hvilket stemmer bra med beskrivelsen av sedimentlaget under overflaten. Forskjellen i overflatelaget mellom disse to prøvene gir med andre ord ikke vesentlig forskjell i estimert kornstørrelse. Det tyder på at ARA kan gi en pekepinn om sedimenttypen når overflaten ikke hovedsakelig består av stein. På den annen side, ved nærmere undersøkelser av kart over estimert kornstørrelse ser vi at stasjon G49/13 ligger på et isolert, lite felt med litt lavere verdier enn omkringliggende arealer. Siden vi ikke har korrigert for eventuell drift i kabelen kan posisjonen av stasjonene i kartet være noe unøyaktig.

Alt i alt er det bra samsvar mellom bunnreflektivitet og overflatelaget, og forholdsvis bra samsvar mellom estimert kornstørrelse og sedimentet i dette området med varierende sedimentasjon. Dessverre ble det ikke tatt utsnitt av sedimentprøvene for analyse av kornfordeling.

6 Lydhastighet og tetthet i sedimentkjerner

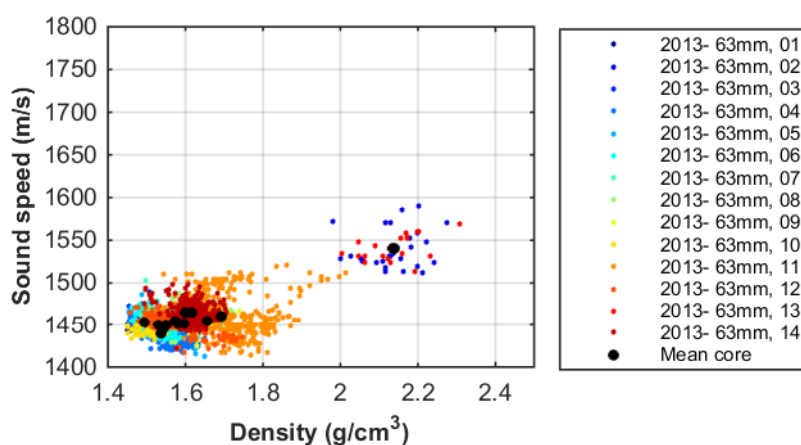
6.1 Tolkning av analyseresultater

Lydhastighet versus gammatetthet er plottet for hver måledybde⁴⁵, for hver av de 40 sedimentkjernene fra Oslofjorden, Nordsjøen og Trøndelagskysten (figur 6.1–figur 6.3). Gjennomsnittsverdien for hver enkelt sedimentkjerne er også plottet. Dessverre er målinger av lydhastighet ikke signifikante i toppen av kjernene som nevnt i kapittel 2.3.1.2, og vi har ikke analyseresultater øverst. Siden tetthet filtreres på trykkbølgeamplitude, flagges også det meste av tetthetsmålinger øverst i kjernene ut (jmfør kapittel 2.3.1.2).

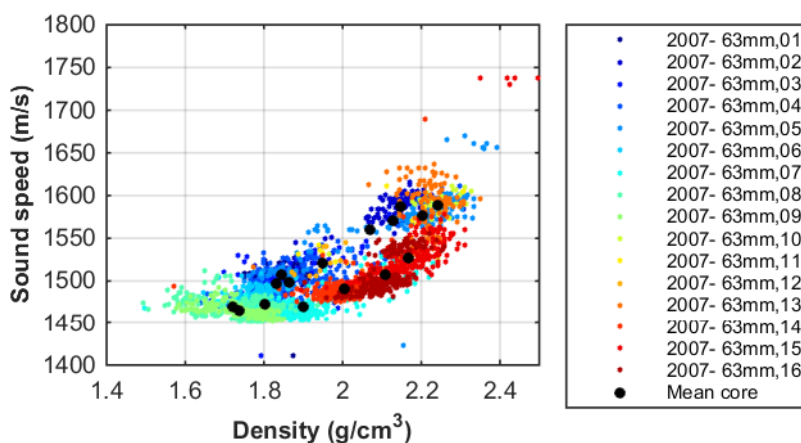
Midlere minste måledybde er 20 ± 15 cm for kjernene fra de tre områdene. Midlere største måledybde er 134 ± 61 cm. Sistnevnte standardavvik er stort siden kjernene som regel er korte for grove sedimenter og lange for fine sedimenter. Analyseresultater for de syv sedimentkjernene fra Barentshavet vises for sammenligning i figur 6.4. Disse har lengde mellom 41 og 274 cm, med et gjennomsnitt på 77 cm. Midlere minste og største måledybde (se tabell 2.6) er omtrent som for sedimentkjernene fra de tre andre havområdene.

⁴⁵ Det vil si dybde for data som ikke er flagget ut (inkluderer tykkelsen av eventuelt oasis-laget).

Resultatene for de fire havområdene sammenfaller overraskende bra (figur 6.5). Generelt er lyd hastigheten lav i forhold til tettheten i sedimentet. Ved tetthet 2 g/cm^3 ligger sedimentlyd hastigheten rundt 1500 m/s ⁴⁶, med spredning fra 1450 til 1550 m/s . Sedimentkjernen C01/13 fra Trøndelagskysten skiller seg ut med høye lyd hastigheter i forhold til tetthet, og mulige forklaringer til dette diskuteres senere i kapittelet. Beregninger foretatt på data fra alle 47 sedimentkjernene fra de fire havområdene (13213 målinger) viser at 5, 50 og 95 %-kvantilene for lyd hastighet er på henholdsvis 1443 , 1481 og 1571 m/s . Kun 1 % av lyd hastighetsmålingene er over 1600 m/s , og dette er en svært liten andel i og med at tettheten er opptil 2.5 g/cm^3 . Lyd hastighetsverdiene er referert til 23°C og 1 atm (vanddyp 0 m).

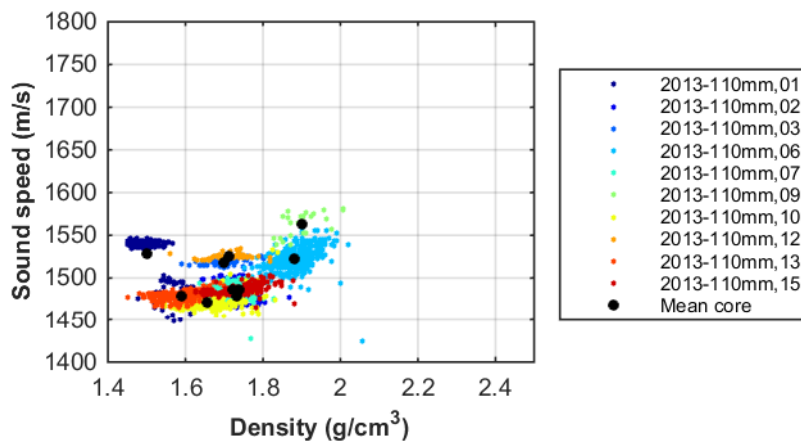


Figur 6.1 Lyd hastighet versus tetthet for 14 sedimentkjerner tatt i Oslofjorden i 2013.

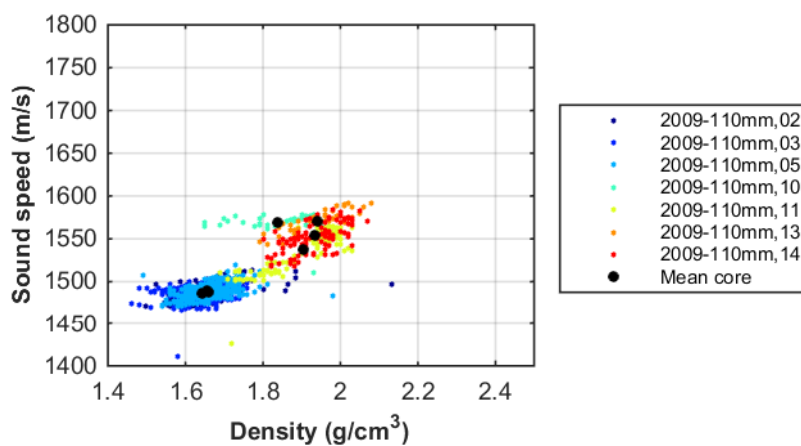


Figur 6.2 Lyd hastighet versus tetthet for 16 sedimentkjerner tatt i nordlige Nordsjøen i 2007.

⁴⁶ Referert til temperatur 10°C og vanddyp 300 m , tilsvarer dette en lyd hastighet på 1477 m/s .



Figur 6.3 Lydhastighet versus tetthet for ti sedimentkjerner tatt utenfor Trøndelag i 2013. Tverrsnitt av kjernene er vist i figur 2.4.



Figur 6.4 Lydhastighet versus tetthet for syv sedimentkjerner tatt i Barentshavet i 2009.

Ved sammenligning av målte observasjoner og Bachmans relasjon mellom lydhastighet og tetthet i sjøbunnsedimenter fra kontinentalsokkelen ved temperatur 23°C og 1 atm trykk, sees tydelig avvik (figur 6.5). Målt lydhastighet er lavere og forskjellen øker med økende tetthet opptil 2.1 g/cm³ som er øvre grense for Bachmans relasjon i likning (2.7). De målte observasjonene er også lavere enn relasjonene i Jackson og Richardson (2007) og Richardson og Briggs (2004), jamfør avsnitt 2.3.2.3. Resultatene diskuteres i kapittel 7.4.

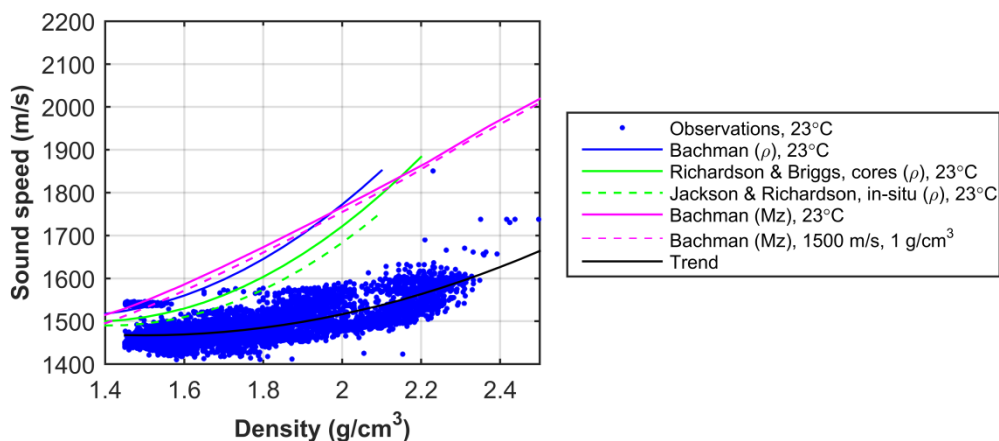
Den lineære regresjonslinjen (andregradspolynom) i figur 6.5 er gitt ved

$$c_{\text{TREND}} = 1912.5 - 593.4\rho + 19.8\rho^2. \quad (6.1)$$

En lineær regresjonslinje (andregradspolynom) basert på midlere tetthet og midlere lydhastighet for alle sedimentkjernene fra Oslofjorden, Nordsjøen (bortsett Korsfjorden-kjernene) og Trøndelagskysten gir bestemmelseskoefisient $R^2 = 0.70$. Når i tillegg sedimentkerne C01/13

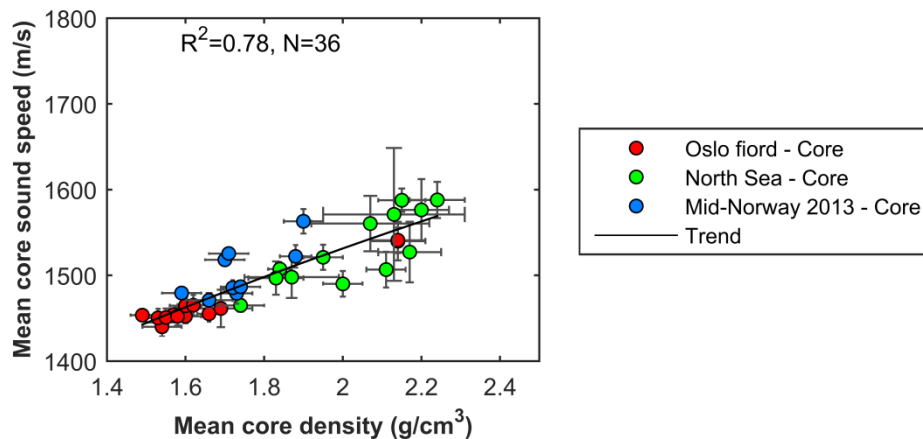
fra Trøndelagskysten flagges ut på grunn av avvikende analyseresultater, øker R^2 til 0.78 (figur 6.6), og regresjonslinjen blir tilnærmet rett. Vi ser at usikkerheten i både midlere lydshastighet og tetthet for hver kjerne øker med økende verdier.

Som nevnt observerer vi størst avvik i figur 6.5 for sedimentkjerne C01/13 fra Trøndelagskysten. Midlere lydshastighet på 1529 ± 25 m/s er høyt sammenlignet med hastigheter i de andre sedimentkjernene i studien, ved midlere tetthet 1.50 ± 0.04 g/cm³. For å prøve å forstå avviket er det interessant å granske annen informasjon. Bunnreflektiviteten er lav i området (-29.5 dB), noe som indikerer finkornige sedimenter. Det øverste laget (30–150 cm) har midlere hastighet 1539 ± 8 m/s, nedenfor dette er et lag med vesentlig lavere hastigheter (1481 ± 15 m/s). Sedimentkjernen er beskrevet å ha et leirlag med skjell-fragmenter helt øverst og “lensens and/or zones” med skjell-fragmenter fra 20 til 150 cm. Strukturen er “faintly laminated (banded) w/gas bubbles” fra 20 cm og nedover. Fra 150 cm og nedover er det et leirlag med skjell-fragmenter igjen. Sedimentprøven som er tatt ut ved snittdybde 1 cm består av 92 % slam og 8 % sand, og passer med tetthet rundt 1.5 g/cm³. Midlere kornstørrelse er 8.1φ. Muligens er det skjellfragmentene som dominerer og gis relativt høy lydshastighet.



Figur 6.5 Lydshastighet versus tetthet for 47 sedimentkjerner tatt i fire forskjellige havområder⁴⁷. Resultatene sammenlignes med empiriske regresjons-relasjoner fra Bachman (1985) og Jackson og Richardson (2007). En lineær regresjonslinje (andregradspolynom) vises også (svart linje).

⁴⁷ Tilsvarende figur 3.5 i eksperimentrapporten (Eidem, 2015a) har feil da observasjonene er ved 13°C og ikke 23°C.



Figur 6.6 Midlere lyd hastighet versus midlere tetthet for 36 av de 40 sedimentkjernene tatt i Oslofjorden i 2013, Nordsjøen i 2007 (unntatt Korsfjorden-prøvene) og langs Trøndelagskysten i 2013 (unntatt C01/13). Standardavviket for begge parametrene er vist som grå linjer. En lineær regresjonslinje (andreggradspolynom) vises også.

6.2 Sammenlikning av lyd hastighet og tetthet med akustiske parametre

Hvordan er korrelasjonen mellom analyseresultater for sedimentkjernene og estimerte akustiske parametre som bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse? Ekkolodd på frekvenser rundt 100 kHz som EM 710 ser bare noen få centimeter ned i havbunnen, mens de 40 sedimentkjernene fra Oslofjorden, Nordsjøen og Trøndelagskysten er opptil til 2.6 m lange. Som nevnt tidligere er det vanskelig å måle lyd hastigheten øverst i sedimentkjernene siden sedimentet ofte ikke fyller plastrøret helt.

6.2.1 Midling over hele kjernelengder

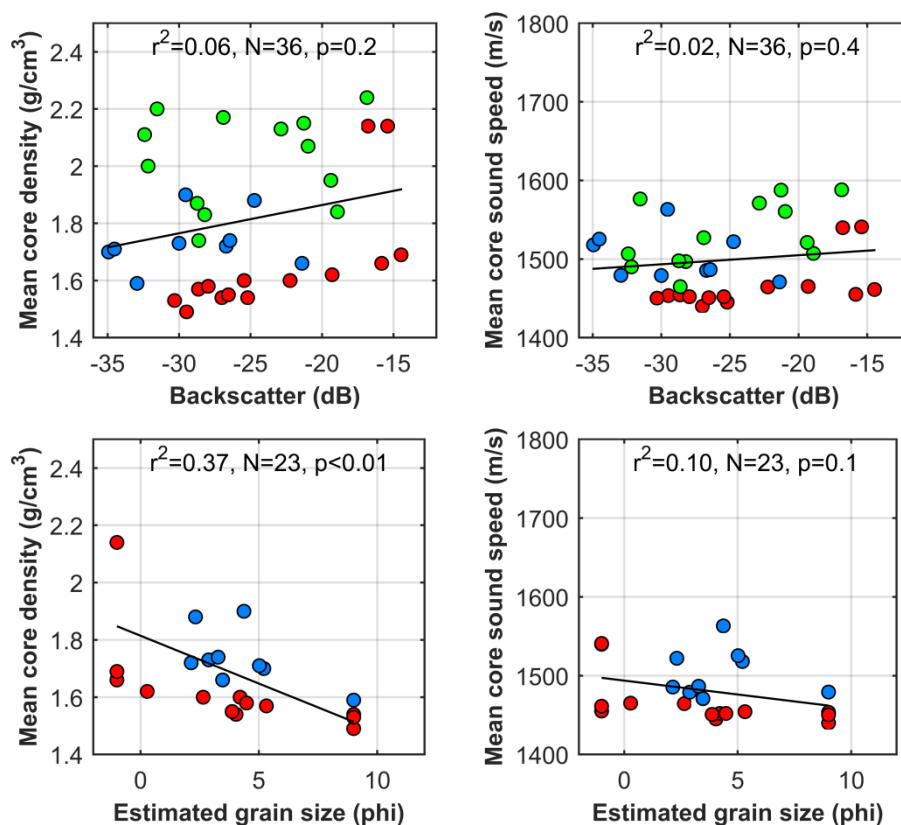
I første omgang undersøkes filtrerte verdier for sedimentkjernene, det vil si data fra alle kjernedybder der det er kvalitetssikrede målinger av lyd hastighet og tetthet. Når alle tre havområdene studeres samlet, er korrelasjonen mellom bunnreflektivitet og midlere lyd hastighet totalt fraværende⁴⁸ med $r^2 = 0.02$ (tabell 6.1 og figur 6.7). Korrelasjonen er like dårlig mellom bunnreflektivitet og midlere tetthet.

Korrelasjonen mellom estimert kornstørrelse og midlere lyd hastighet for kjernene fra Oslofjorden og Trøndelagskysten 2013 samlet er svak til moderat ($r^2 = 0.10$), men estimert kornstørrelse når maksimum (9ϕ) og minimum (-1ϕ) for mange av stasjonene. Korrelasjonen er sterkere mellom estimert kornstørrelse og midlere tetthet ($r^2 = 0.37$).

Det er tydelige forskjeller i korrelasjonen mellom prøvene fra de tre områdene (figur 6.7). Korrelasjonen er sterk mellom de akustiske og geoakustiske parametrene for data fra Oslofjorden, og mer variabel for data fra de to andre områdene. Den svake korrelasjonen når

⁴⁸ De tre sedimentkjernene fra Korsfjorden og sedimentkerne C01/13 fra Trøndelagskysten er flagget ut.

data fra alle tre områdene inkluderes i tallmaterialet skyldes dels at korrelasjonen har motsatt retning, dels en bias mellom områder.



Figur 6.7 Estimert kornstørrelse og bunnreflektivitet versus midlere lydshastighet og tetthet i hele kjernelengder. Lydshastighet og tetthet er filtrert på trykkbølgeamplitude.

Når lydshastighetsverdier plottes på kart over estimert kornstørrelse sees tydelig avvik for enkelte stasjoner. Ved nærmere undersøkelser av fotografier av sedimentkjernene og beskrivelser av lagene som UiB har gjort, ser vi at for utvalgte stasjoner der det er stort avvik mellom estimert kornstørrelse og målt lydshastighet, er lydshastigheten øverst i kjernene ikke målt. Det gjelder for eksempel sedimentkerne C02/13 fra Trøndelagskysten som har midlere lydshastighet 1479 m/s. Estimert kornstørrelse lik 2.9 ϕ tyder på sand. Prøven beskrives å ha et 10–15 cm øvre lag av sand og sand med skjell-fragmenter, og nedenfor er det leir og siltig leir (dette er synlig på fotografiet). Sedimentprøven tatt ut ved snittdybde 3 cm har median-kornstørrelse 2.8 ϕ . Med andre ord stemmer estimert kornstørrelse med sedimentet øverst i kjernen. Lydshastigheten er først målbar fra 35 cm og dypere. Tettheten er målbar fra 10 cm og nedover, og ved 15 cm er denne 1.9 g/cm³. Sedimentkerne C07/13 fra Trøndelagskysten er et annet eksempel. Øverst i sedimentkjernen er det et tynt lag med sand, og nedenfor siltig leir. Sedimentprøven fra overflatelaget har målt mediankornstørrelse 3.0 ϕ , og estimert kornstørrelse er 2.1 ϕ . Begge verdier tyder på sand. Midlere lydshastighet er lav med 1486 m/s, men også her

lar ikke lydshastigheten seg måle i de øverste 20 cm av kjernen. Tettheten er 1.9 g/cm³ ved 8 cm måledybde.

Midlere, filtrerte verdier for lydshastighet og tetthet i sedimentkjerner kan med fordel vises som et eget lag i kartapplikasjoner med opplysning om hvilket dybdeintervall verdiene gjelder for.

Parameterpar	Lengde	O	N	T13	O(N)T
Tetthet (g/cm ³) – est. kornstørrelse (φ)	Max	0.45	–	0.30	0.37
	20 cm	0.55	–	0.70	0.46
Lydshastighet (m/s) – est. kornstørrelse (φ)	Max	0.36	–	0.00	0.10
	20 cm	0.43 ^a	–	0.22 ^b	0.18
Tetthet (g/cm ³) – bunnreflektivitet (dB)	Max	0.49	0.02	0.06	0.06
	20 cm	0.61	0.00	0.24	0.07
Lydshastighet (m/s) – bunnreflektivitet (dB)	Max	0.38	0.24	0.11	0.02
	20 cm	0.47 ^a	0.38 ^c	0.00 ^b	0.04

Tabell 6.1 Pearsons korrelasjonskoeffisient kvadrert (r^2) mellom estimert kornstørrelse og bunnreflektivitet, versus midlere tetthet og lydshastighet for sedimentkjernene fra Oslofjorden ($N = 14$), Nordsjøen ($N = 13$) og Trøndelagskysten 2015 ($N = 9$). Midlingen er foretatt over hele kjernelengder (maksimum 300 cm) og de øverste 20 cm. Den siste kolonnen lister korrelasjonen når data fra alle tre (begge to) områdene er inkludert. Tetthet er ikke filtrert på trykkbølgeamplitude ved midling over 20 cm.

^aAntall prøver er redusert til $N = 9$.

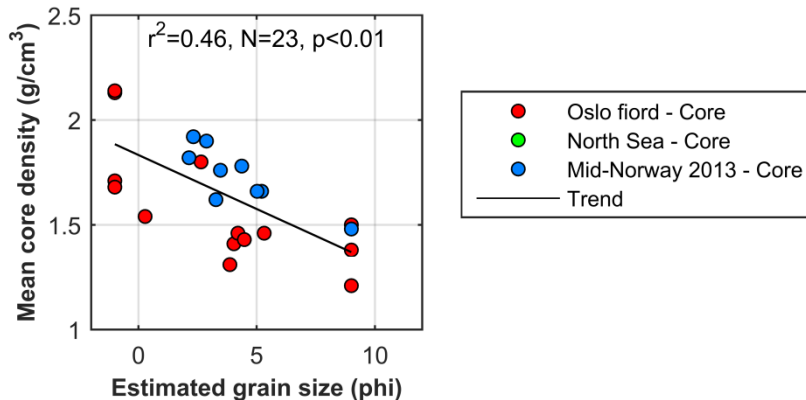
^bAntall prøver er redusert til $N = 7$.

^cAntall prøver er redusert til $N = 8$.

6.2.2 Midling over de øverste 20 cm

Dersom vi sammenligner gjennomsnittlig lydshastighet og tetthet i de øverste 20 cm⁴⁹ med akustiske parametre, øker korrelasjonen noe (tabell 6.1). For å få størst mulig datasett filtreres ikke tetthet på trykkbølgeamplitude. Høyest korrelasjon ($r^2 = 0.46$) oppnås igjen mellom estimert kornstørrelse og tetthet (figur 6.8). Korrelasjonen er svært lav mellom bunnreflektivitet og de fysiske sediment-parametrene ($r^2 < 0.07$).

⁴⁹ Laveste tillatte tetthet er redusert fra 1.45 g/cm³ til 1.0 g/cm³. Endringen har størst betydning når det ikke filtreres på trykkbølgeamplitude. Ved filtrering flagges de laveste tetthetsverdiene ut uansett, da det sjelden er gode lydshastighetsmålinger aller øverst i kjernene. Merk at de 20 cm inkluderer et eventuelt oasislag.



Figur 6.8 Estimert mediankornstørrelse versus midlere tetthet i de øverste 20 cm (inkludert oase) av 23 sedimentkjerner fra Oslofjorden og Trøndelagskysten 2013.

6.3 Sammenlikning av lydshastighet og tetthet med sedimentprøver fra kjernene

Sedimentprøver for analyse av kornfordeling ble tatt fra overflatelaget i 39 av de 40 kjernene, på snittdybde 6 ± 4 cm (eksklusiv oase). Det kan derfor i verste fall være rundt 35 cm i forskjell mellom snittdybde og minste dybde hvor lydshastigheten er målt. Korrelasjonen mellom lydshastighet/tetthet og kornstørrelse for 34 av de unimodale sedimentprøvene⁵⁰ undersøkes nedenfor.

6.3.1 Midling over hele kjernelengder

Andelen sand/grus og kornstørrelse for sedimentprøvene varierer mye og gjenspeiler ikke den svake spredningen i midlere lydshastighet for de samme kjernene⁵¹ (figur 6.9). På det beste er $r^2 = 0.23$ ved lineær regresjon basert på data fra alle tre havområdene. Når områdene studeres hver for seg, observerer vi svært lav korrelasjon for dataene fra Trøndelagskysten (tabell 6.2). Derimot er korrelasjonen høyere for dataene fra Nordsjøen og Oslofjorden. Høyest korrelasjon oppnås mellom lydshastighet og målt kornstørrelse for data fra Nordsjøen ($r^2 = 0.60$). Vi observerer også at ved samme målte kornstørrelse eller andel sand/grus, er det gjennomgående høyere gammatetthet i sedimentkjernene fra Nordsjøen enn i kjernene fra Oslofjorden og Trøndelagskysten (figur 6.9). For lydshastigheten er samme tendens til stede, men ikke like tydelig. Sedimentprøvene skiller seg ikke vesentlig fra hverandre foruten at prøvene fra Trøndelagskysten i gjennomsnitt er noe grovere:

- De 12 prøvene fra Oslofjorden tatt i 2013 har mediankornstørrelse fra 1.0 til 8.2 ϕ , med et gjennomsnitt på $6.7 \pm 2.6\phi$. Grus- og sand-innholdet varierer fra 3 til 81 %, med et

⁵⁰ Tre sedimentprøver av kjernene fra Korsfjorden og to sedimentprøver med bimodal kornstørrelsesfordeling er flagget ut.

⁵¹ For å flagge ut upålitelige data, ble 1410 m/s satt som laveste aksepterte lydshastighetsverdi.

gjennomsnitt på 21 ± 28 %. Laginndelingen i sedimentkjernene er ikke beskrevet av UiB.

- De 13 prøvene fra Nordsjøen tatt i 2007 har mediankornstørrelse fra 2.1 til 11.0 ϕ , med et gjennomsnitt på $7.0 \pm 3.2\phi$. Grus- og sand-innholdet varierer fra 1 til 69 %, med et gjennomsnitt på 30 ± 25 %. Lag i sedimentkjernene beskrives som siltholdig leir (med sand eller sporadisk sand), siltholdig sand, leirholdig silt (med sand), sand (med silt og leir), sandholdig siltholdig leir og sandholdig silt. Steiner, skjellfragmenter og lenser med grov sand forekommer.
- De ni prøvene fra Trøndelagskysten tatt i 2013⁵² har mediankornstørrelse fra 2.8 til 8.2 ϕ , med et gjennomsnitt på $5.9 \pm 2.1\phi$. Grus- og sand-innholdet varierer fra 8 til 79 %, med et gjennomsnitt på 36 ± 24 % – som er høyere enn i de to andre områdene⁵³. Lag i sedimentkjernene beskrives som leir, siltholdig leir, sand, sandholdig siltholdig leir. Skjellfragmenter, lenser med skjellfragmenter og sand, og gassbobler forekommer.

Sedimentkerne C08/13 fra Oslofjorden skiller seg ut i figur 6.9 med lav midlere lydshastighet 1465 m/s, lav midlere tetthet 1.6 g/cm³ og målt mediankornstørrelse er 1.0 ϕ . Nærmere undersøkelser viser at det mangler lydshastighetsmålinger fra de øverste 30 cm i sedimentkjernen. Gammatettheten er derimot målt og denne er størst øverst i kjernen (2 g/cm³ på 11 cm måledybde). Sediment-utsnittet og tetthetsmålinger av hele kjernen viser en grov overflate, men siden vi filtrerer de akustiske dataene på trykkbølgeamplitude blir kjernen en uteligger i figur 6.9.

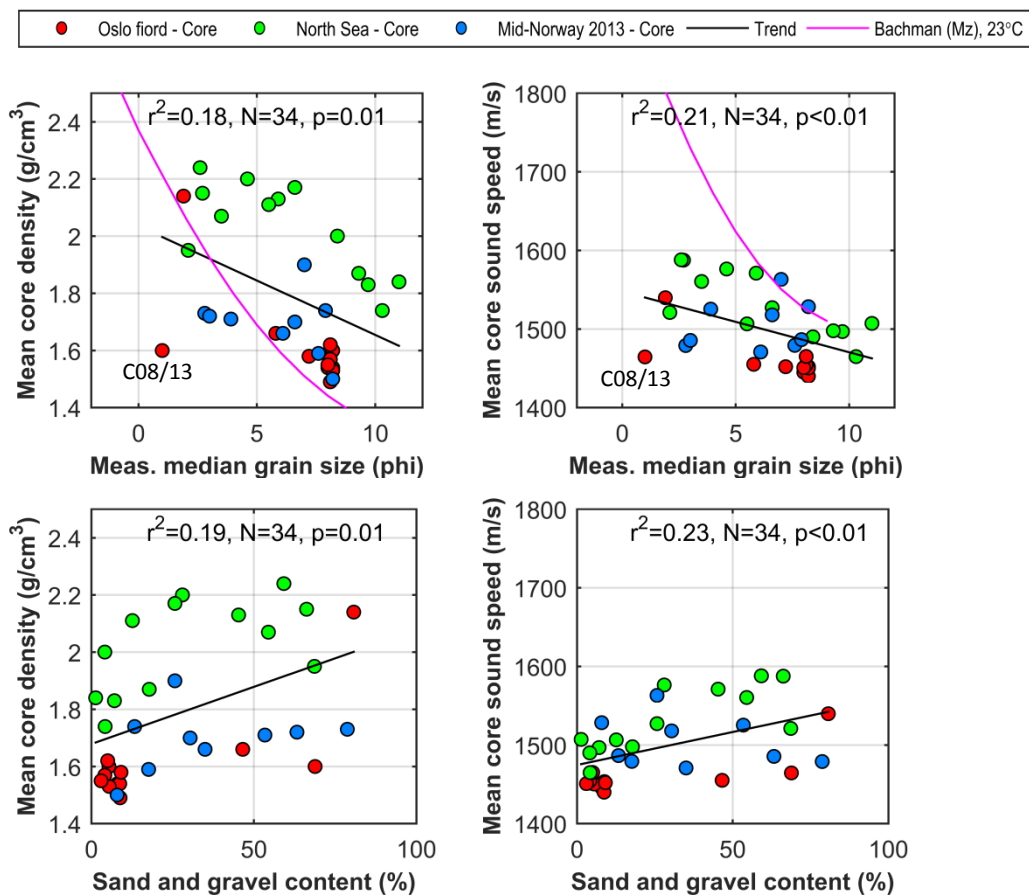
Parameterpar	O (Max)	N (Max)	T13 (Max)	ONT (Max)	ONT (20 cm)
Tetthet (g/cm ³) – målt kornstørrelse (ϕ)	0.43	0.56	0.08	0.18	0.29
Lydshastighet (m/s) – målt kornstørrelse (ϕ)	0.47	0.60	0.07	0.21	0.43 ^a
Tetthet (g/cm ³) – andel sand/grus (%)	0.56	0.32	0.10	0.19	0.33
Lydshastighet (m/s) – andel sand/grus (%)	0.56	0.59	0.08	0.23	0.23 ^a

Tabell 6.2 Pearsons korrelasjonskoeffisient kvadrert (r^2) mellom målt mediankornstørrelse og andel sand/grus i sedimentprøvene fra Oslofjorden, Nordsjøen og Trøndelagskysten 2015, versus midlere tetthet og lydshastighet i sedimentkjernene ($N = 34$). Midlingen er foretatt over full kjernelengde (max, opptil 300 cm). De to siste kolonnene lister gjennomsnittet for alle tre områdene for full kjernelengde og de øverste 20 cm.

^aAntall prøver er redusert til $N = 21$ på grunn av manglende eller dårlig kvalitet på målinger av lydshastighet øverst.

⁵² I 2015 ble det kun tatt grabbprøver langs Trøndelagskysten

⁵³ Prøvetakingen langs Trøndelagskysten ble planlagt ut i fra kart over estimert kornstørrelse. Bunnprøvestasjoner ble valgt ut der sannsynligheten for å finne grovkornede sedimenter var forholdsvis stor.



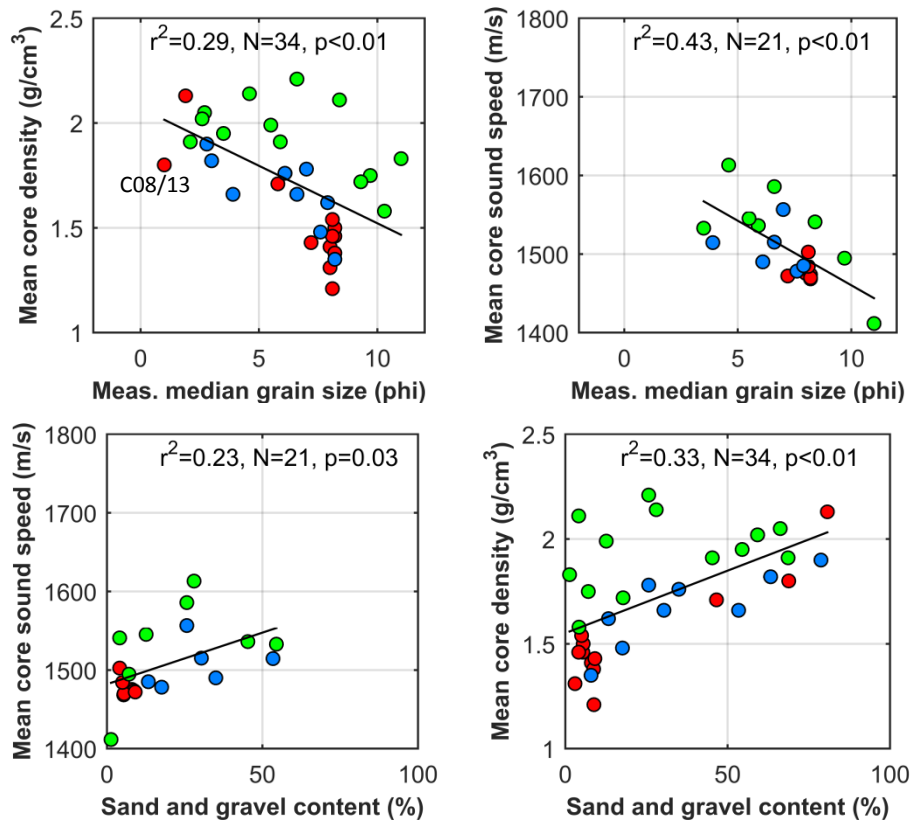
Figur 6.9 Andel grove sedimenter og målt mediankornstørrelse versus midlere lydshastighet og midlere tetthet for 34 sedimentkjerne (full kjernelengde og filtrering på trykkbølgeamplitude). Bachmans relasjoner (rosa linjer) baserer seg på midlere og ikke mediankornstørrelse.

I andre tilfeller er tettheten veldig lav øverst. Sedimentkjerne C01/13 fra Oslofjorden har gradvis økende tetthet fra 1 g/cm³ ved 15 cm måledybde, til 1.4 g/cm³ på 40 cm måledybde. Første måledybde for lydshastighet er ved 45 cm (inkludert oasis). Den lave verdien på tetthet kommer heller ikke frem i lydshastighet versus tetthet på grunn av metoden som er brukt. Sedimentprøven tatt ut øverst i kjernen er klassifisert som slam med målt kornstørrelse 8.1φ.

De målte dataene avviker fra Bachmans relasjoner mellom tetthet, lydshastighet og kornstørrelse (likning (2.5)). Relasjonene er basert på midlere kornstørrelse, men denne ikke så forskjellig fra mediankornstørrelsen at det kan forklare avviket i figur 6.9. Også for tettheten som er lettere å måle er det tydelig avvik i forhold til Bachmans relasjon.

6.3.2 Midling over de øverste 20 cm

Dersom tetthet ikke filtreres på trykkbølgeamplitude, og lydshastighet og tetthet midles over kun de øverste 20 cm inkludert oasis øker korrelasjonen i tre av fire tilfeller (tabell 6.2 og figur 6.10).



Figur 6.10 Andel grove sedimenter og målt mediankornstørrelse versus midlere tetthet og midlere lyd hastighet for henholdsvis 34 og 21 sedimentkjerner. Kun data fra de øverste 20 cm av kjernene er inkludert i beregning av midlere tetthet og lyd hastighet; ingen filtrering på trykbølgeamplitude.

Først og fremst er det grove sedimentprøver som ikke har lyd hastighetsmålinger i de øverste 20 cm, og dette kan sees ved å sammenligne figur 6.10 med figur 6.9. Det var forventet at økningen skulle være størst for tettheten, men det er ikke tilfelle. Høyest korrelasjon oppnås mellom målt median kornstørrelse og lyd hastighet.

7 Diskusjon

7.1 Prosessering av bunnkart

Det har vært en utfordring med prosesseringen av bunnkart at FMGeocoder Toolbox (FMGTo) har vært og er under utvikling og stadig nye oppdateringer utgis. Det har blitt mange reprosesserings av både måleoppdrag og hele havområder av den grunn. Det har sågar blitt introdusert feil fra QPS sin side som har blitt rettet opp i senere versjoner. QPS fant i 2014 ut at enkelte relevante parametre er skalert feil i datagrammet til Kongsberg *.all filer fra EM 710 med PSV⁵⁴ forut for 2.1.8. Dette gjelder “Backscatter at nadir” BSn og “Backscatter at oblique angle” BSo. I PSV forut for 2.0.6 er det en skaleringsfeil i “Range to normal incidence” Rn (se Technical Note 4: Error in older Kongsberg Seabed imagery datagram (QPS, 2014)). Feilene viste seg hovedsakelig å gi utslag for ARA-resultatene. I Fledermaus versjon 7.4.1a lansert august 2014 var en korreksjon i FMGTo inkludert som rettet opp for disse feilene. Måleoppdrag prosessert med versjon før 7.4.1a måtte dermed reprosesserer. PSV 2.0.7 ble tatt i bruk før kartleggingen i september 2009 i Nordsjøen. Under kartleggingen i august 2008 i Nordsjøen ble først PSV 1.3.9 og deretter PSV 2.0.1 benyttet. PSV 2.1.8 ble installert før kartleggingen i Oslofjorden startet i mars 2011. Om Fledermaus-versjonene som er benyttet ved prosessering av kartene i rapporten er korrekte vil bare tiden vise⁵⁵.

Det har dessverre ikke vært noen sikker metode for å kalibrere bunnreflektivitetsdataene, noe som er nødvendig når samme område kartlegges med forskjellige sonarer og/eller til ulike årstider (Lurton og Lamarche, 2015). Kvaliteten på dataene samlet inn med EM 710 i de tre havområdene er meget bra i den forstand at det er samsvar mellom nærliggende måleoppdrag og overlappende linjer. Under dagens dybdekartlegginger med M/S H.U. Sverdrup II etterstrebes bevisst å bruke standardiserte settinger. Bunnreflektivitetsdataene samlet inn med EM 1002 har vært utfordrende å prosessere av flere årsaker. For det første, når innlesning av en lyd hastighetsprofil har gått feil under kartleggingen, kan absorpsjonskoeffisienten bli satt til 0 eller 100 dB/km og bunnreflektiviteten bli svært lav. Fra og med Fledermaus versjon 7.4.1a er det mulig å sette absorpsjonskoeffisienten manuelt, og ved senere reprosessering vil denne feilen rettes opp. For det andre settes utsendt pulslengde⁵⁶ (TX pulse length, pingmode) av operatørene og i de første årene varierte denne fra måleoppdrag til måleoppdrag, og i visse tilfeller også innenfor et enkelt oppdrag/datafil. Dette vises tydelig ved dårlig samsvar mellom nærliggende hele eller deler av måleoppdrag og/eller enkeltlinjer. Fra og med versjon 7.6 av Fledermaus som

⁵⁴ Informasjon om PSV kan finnes ved å bruke programvaren Datagram Viewer fra Kongsberg. Versjonsnummeret ligger under Installation.

⁵⁵ Forfatteren er noe usikker på om geo-refereringen av celler i FMGTo er helt rett. Ved sammenligning av celler med forskjellig oppløsning synes det som om det er en liten forskyvning. Dette ble meldt inn til QPS i 2015 og i 2017. Desto viktigere er den romlige midlingen ved beregning av bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse som gjøres i rapporten.

⁵⁶ For å finne hvilke settinger som ble brukt under dybdekartlegging, ble rådatafiler (Kongsberg *.all-filer) lest av Datagram Viewer v2.3.0 fra Kongsberg Underwater Technology. Bunnreflektiviteten er høyere for medium enn for dyp og grunn pingmode.

ble utgitt i juni 2016, er det mulig å kompensere for forskjellige pingmoder, og ved eventuell repressering av EM 1002-dataene vil dette være en nyttig opsjon.

I denne studien er normalisering av data fra EM 1002 gjort manuelt for måleoppdrag fra årene 2003–2007 ved å bruke de nyeste måleoppdragene (data tatt opp i perioden 2008–2013 med EM 710) som referanse. Bunnreflektiviteten for eldre måleoppdrag er justert ved å legge til en verdi i kartet for hvert enkelt måleoppdrag. Verdiene er bestemt visuelt eller ved å beregne forskjell i bunnreflektivitet for overlappende områder i ArcGIS, og har naturlig nok sine svakheter. Verdiene for bunnreflektivitet i områdene som ble kartlagt i 2003–2007 er derfor beheftet med en viss usikkerhet. Merk at det kan være brukt forskjellig normaliseringsverdi for kart fra de ulike versjonene av Fledermaus (7.3.6a, 7.4.1a, 7.4.2).

Det er tydelig begrensinger med metoden for beregning av estimert kornstørrelse i FMGTo (Angular Range Analysis). Det er betenkelig at såpass mange stasjoner når yttergrensene på -1ϕ og $8.8-9\phi$. Estimert kornstørrelse er generelt grovere (lavere ϕ -verdi) enn målt (median) kornstørrelse, men for stasjoner der estimert kornstørrelse er 9ϕ er det motsatt.

7.2 Korrelasjoner mellom akustiske og sedimentære parametre

I McGonigle og Collier (2014) er tilsvarende korrelasjoner som i denne studien beregnet basert på blant annet 156 sedimentprøver tatt med en 0.1 m^2 Hamon-grabb i et 3 300 km^2 område i sørlige Nordsjøen, mellom England og Nederland. Utsnitt på 0.5 liter ble analysert for kornfordeling. Målt midlere kornstørrelse lå mellom -2 og 4.5ϕ , det vil si litt grovere sedimenter enn i vår studie. FMGTo ble brukt for å beregne midlere bunnreflektivitet fra EM 3000D (300 kHz) i et 50 m^2 stort område rundt hver prøvestasjon (tilsvarende et sirkulært område med radius 4 m). Området er $1/25$ av arealet bunnreflektivitet midles over i denne studien, og krever en posisjoningsnøyaktighet vi ikke har i våre data. Korrelasjonen mellom bunnreflektivitet og median kornstørrelse er moderat ($r^2 = 0.23$), som er likt med resultatet i tabell 5.1 når vi midler over alle tre havområdene (tabell 7.1). Korrelasjonen med midlere kornstørrelse er noe høyere ($r^2 = 0.28$). Korrelasjon mellom estimert kornstørrelse og målt median kornstørrelse er moderat ($r^2 = 0.22$) i McGonigle og Collier (2014) og vesentlig lavere enn i vår studie. Også i McGonigle og Collier (2014) blir estimert kornstørrelse for en del stasjoner lik laveste mulige verdi i FMGTo (-1ϕ). Høyest korrelasjon blant de valgte sedimentparametrene i McGonigle og Collier (2014) er det mellom bunnreflektivitet og andel grus ($r^2 = 0.34$). I vår studie har en vesentlig andel sedimentprøver 0% grus, og derfor har vi korrelert med andelen sand/grus i stedet for bare med grus. For sammenligningens skyld vises korrelasjonen med andel grus i tabell 7.1. Dessverre inkluderer ikke McGonigle og Collier (2014) korrelasjon mellom akustiske parametre og andel sand/grus.

I Goff m.fl. (2000) plottes bunnreflektivitet fra Simrad EM 1000 (95 kHz) versus midlere kornstørrelse for 300 grabbprøver fra tre regioner. Sedimentprøver på $100-300 \text{ g}$ ble analysert for kornstørrelsesfordeling. Et av områdene har høy korrelasjon mellom bunnreflektivitet og midlere kornstørrelse, uten at denne er tallfestet. Sedimentprøvene herfra er unimodale og vel-sorterte. Noen få prosent grove korn/skjell ($> 4 \text{ mm}$) i foruten disse unimodale sedimentprøver

blir antydning som forklaring på vesentlig høyere bunnreflektivitet og svakere korrelasjon i en annen region.

I Medialdea m.fl. (2008) plottes bunnreflektivitet fra Simrad EM 12S-120 (13 kHz) versus andel sand/grus for sedimentprøver fra 3–5 m lange sedimentkjerner. Simrads Poseidon programvare ble brukt for prosessering av bunnreflektivitet. Andel sand og grus ble midlet over det øverste 50 cm av de 16 kjernene. Bunnreflektivitet ble midlet over et område på 100 x 100 m rundt hver kerneprøvestasjon. Korrelasjonen mellom bunnreflektivitet og andel sand/grus er sprikende; datapunktene grupperer seg i to populasjoner. Tre av de groveste sedimentprøvene beskrevet som sand og slamholdig sand (med 25–64 % sand/grus) viser positiv korrelasjon med bunnreflektivitet. De andre prøvene som alle bortsett fra én har mindre enn 14 % sand/grus, har mot forventet stort sett høyere bunnreflektivitet. En forklaring på sistnevnte resultat avdekkes ikke i Medialdea m.fl. (2008). I samme artikkel studeres også forholdet mellom tetthet, lydshastighet og bunnreflektivitet. De to førstnevnte er også midlet over de øverste 50 cm av kjernene. En invers korrelasjon mellom tetthet og bunnreflektivitet ser ut til å være tilfelle for en gruppe av datapunktene. Sammenligning av lydshastighet og bunnreflektivitet gir ingen klare sammenhenger mellom disse to parametrene, og dette er i tråd med resultatene i vår studie (tabell 6.1).

Parameterpar	McGonigle og Collier (2014)	O(N)T
Andel sand/grus (%) – bunnreflektivitet (dB)	–	0.29
Andel sand/grus (%) – estimert kornstørrelse (ϕ)	–	0.52
Andel grus (%) – bunnreflektivitet (dB)	0.34	0.29
Andel grus (%) – estimert kornstørrelse (ϕ)	0.27	0.31
Målt median kornstørrelse (ϕ) – estimert kornstørrelse	0.22	0.46
Målt median kornstørrelse (ϕ) – bunnreflektivitet (dB)	0.23	0.23
Målt midlere kornstørrelse (ϕ) – estimert kornstørrelse	0.28	–
Målt midlere kornstørrelse (ϕ) – bunnreflektivitet (dB)	0.23	–
Antall prøver	156	90/50

Tabell 7.1 Pearsons korrelasjonskoeffisient kvadrert (r^2) mellom sedimentprøver og akustiske data fra Oslofjorden, Nordsjøen, Trøndelagskysten 2013 og Trøndelagskysten 2015, sammenlignet med resultater fra en tilsvarende undersøkelse i sørlige Nordsjøen. Estimert kornstørrelse for stasjoner i Nordsjøen er ikke med i datagrunnlaget.

I studien er dybde data prosessert med oppløsning på 5 m i Oslofjorden og 20 m på Trøndelagskysten og i Nordsjøen. Trøndelagskysten er kupert med midlere helning på 4.6°. Dette er omtrent som i Oslofjorden som har midlere helning på 5.7° og vesentlig mer kupert enn i Nordsjøen med midlere helning under 1°.

7.3 Grabbprøver og sedimentprøver

En av utfordringene med å ta utsnitt av grabbprøvene for analyser oppstår når overflaten er vesentlig mer grovkornet enn sedimentet under. Dette erfares på tokt under grabbprøvetaking, og vises på fotografier av grabbprøver (figur 3.1). Både FFI og UiB må foreta valg av utsnitt. Det er en pågående diskusjon hvor utsnittet som analyseres kvantitativt skal tas fra for å beskrive havbunnen best mulig med tanke på Forsvarets behov for bunnkart. Ekkolodd med frekvens 70–100 kHz⁵⁷ har en bølgelengde på ca. 2 cm og ser veldig kort ned i havbunnen. Områder med høy bunnreflektivitet kan derfor ha en grovkornet overflate, med finkornede sedimenter rett under, noe som er bekreftet i studien. Når utsnittet av grabbprøver tas fra sedimentlaget under et eventuelt grovere overflatelag, vil det bli dårligere samsvar mellom bunnreflektivitet, estimert kornstørrelse og målt kornstørrelse. Her er det behov for standardiserte metoder for sediment-uttak både på tokt og i analyselaboratorium. Det er også viktig på tok å beskrive både overflatelaget og sedimentet under, og gjerne ta fotografier av vertikale snitt.

I rapporten er mediankornstørrelsen benyttet fordi kornstørrelsesfordelingen som regel ikke er samlet tett nok til å beregne midlere kornstørrelse basert på kvantilene 16 %, 50 % og 84 %, eller 25 %, 50 % og 75 %. Dette er en svakhet da 1) i litteraturen ofte benyttes midlere kornstørrelse (Bachmans relasjoner er beregnet for midlere kornstørrelse), og 2) mediankornstørrelsen beskriver ikke et sediment like godt som midlere kornstørrelse.

Mye tid er brukt på å tolke analyseresultatene for de 50 sedimentprøvene fra Trøndelagskysten som er analysert for kornstørrelse. Resultatene er av forskjellige årsaker usikre, og det kan forklare den dårlige korrelasjonen mellom fysiske og akustiske parametre. Her nevnes:

- Det er ikke gjort noe forsøk på å undersøke om leirinnholdet i de 27 sedimentprøvene analysert med Malvern Mastersizer 3000 er for lavt, jamfør Rise og Brendryen (2013). Mye kan tyde på dette da leirinnholdet i gjennomsnitt er 7.2 % og høyeste leirinnhold er 15.1 %.
- Kornstørrelsesanalyser på de 20 prøvene fra Trøndelagskysten 2015 er utført med Malvern Mastersizer 3000. Prøvene ble ikke siktet og det er sett bort fra eventuelle korn grovere enn 3.5 mm. For de 13 finkornige sedimentprøvene er dette uten betydning siden innholdet av korn grovere enn 1 mm er lik eller mindre enn 1 %. For de resterende syv prøvene er oppløsningen for dårlig for korn grovere 0.4–0.6 mm, og kornstørrelsesfordelingene er bimodale. I GRADISTAT skal det settes ett sikte grovere enn det som er benyttet under analysene, og for de syv prøvene har vi satt et fiktivt sikte på 9 mm for å estimere grus- og sandinnhold. Andre størrelser på det fiktive siktet, kan påvirke estimatene. Størst usikkerhet i grusinnholdet er det for G12/15, der det er 36 % korn større enn 0.6 mm.

⁵⁷ Forsvaret er typisk interessert i mye lavere frekvenser.

-
-
- For de 23 prøvene fra Trøndelagskysten 2013 som kun er siktet, er mediankornstørrelsen estimert i GRADISTAT. Resultatene er usikre på grunn av for få sifter for grovfraksjonen (kun fire eller fem) og manglende analyse av finfraksjonen.
 - I 2014 og 2015 ble det tatt utsnitt av de samme syv grabbprøvene fra Trøndelagskysten 2013. Finfraksjonen av utsnittene ble analysert i 2014 med Sedigraph og i 2015 med Malvern Mastersizer 3000. Analyseresultatene viser noe forskjellig kornstørrelsesfordeling (forskjellig analyseapparat kan forklare noe av forskjellen, men det er også vanskelig å ta ut eksakt samme snitt). I rapporten er analyseresultatene fra 2015 brukt (én prøve er flagget ut på grunn av bimodalitet).

7.4 Lydhastighet og tetthet i sedimentkjerner

De relativt lave lydhastighetene i forhold til tetthet som vises i kapittel 6 er vanskelig å forklare. Er det feil ved innsamlingsmetode, målemetodikk eller tolkning av måleresultatene? Sedimentkjernene har to dimensjoner (63 og 110 mm), og de er tatt fra fire forskjellige havområder. Analysene er foretatt direkte etter tokt eller noe i etterkant. Felles er at alle prøvene er tatt fra FFIs forskningsfartøy og alle er analysert ved UiB. En utfordring er at lydhastighet ikke lar seg måle øverst i kjernene, i motsetning til tettheten. Ved sammenligning av lydhastighet og tetthet i hele kjerner i studien er det derfor valgt å filtrere på trykkbølgeamplitude, og kun kjernedybder⁵⁸ der både lydhastighet og tetthet er målt inkluderes i tallmaterialet i kapittel 6.1. Dette er gjort med tanke på sammenligning av lydhastighet og tetthet med publiserte empiriske relasjoner.

Det kan videre diskuteres om det er legitimt å sammenligne lydhastighet versus kornstørrelse eller andel grovkornede sedimenter, slik det gjøres i rapporten, nettopp siden det er vanskelig å måle lydhastigheter i øvre del av kjernene der hvor de fleste sedimentprøvene tas ut. Når midlingen er over de øverste 20 cm av sedimentkjernene i stedet for full kjernelengde øker korrelasjonen. Det bør diskuteres om andre metoder er mer velegnet til å måle lydhastighet og tetthet i havbunnen enn å ta kjerneprøver.

⁵⁸ Omtales som måledybde i rapporten.

8 Avslutning og anbefalinger for videre arbeid

Kart over bunnreflektivitet er produsert i Fledermaus Geocoder Toolbox (FMGTo) for tre havområder langs kysten av Norge: Oslofjorden, Nordsjøen og Trøndelagskysten. Kart over estimert kornstørrelse er produsert for Oslofjorden og Trøndelagskysten. For Nordsjøen er det produsert et kart over estimert kornstørrelse basert på forholdet mellom bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse i Oslofjorden og langs Trøndelagskysten.

Hovedkonklusjoner:

- Analyser viser sterk korrelasjon både mellom estimert kornstørrelse og andel sand/grus ($r^2 = 0.53$), og mellom estimert kornstørrelse og målt mediankornstørrelse ($r^2 = 0.46$) for data fra Oslofjorden og Trøndelagskysten.
- Både bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse gjenspeiler de øverste par centimeterne av havbunnen.
- Estimert kornstørrelse er generelt grovere (lavere ϕ -verdi) enn målt (median) kornstørrelse, men for stasjoner der estimert kornstørrelse er oppunder 9ϕ er det motsatt.
- Største mulige estimerte kornstørrelse i FMGTo er 2 mm. Det ser ut til å gi begrensinger i bruken av verktøyet, eventuelt utfordringer i analysen av kart over estimert kornstørrelse.
- Målinger foretatt på sedimentkjernene viser overraskende lave verdier for lydshastighet versus tetthet, og avviker fra det som er funnet i litteraturen.
- Korrelasjonen mellom fysiske parametre (andel sand og grus, mediankornstørrelse) og geoakustiske parametre (lydshastighet, tetthet) midlet over hele kjerner varierer med havområde. Svakest korrelasjon er det på Trøndelagskysten. Korrelasjonen øker når kun data fra de øverste 20 cm av sedimentkjernene fra de tre havområdene inkluderes i analysen.
- Det er ingen korrelasjon mellom bunnreflektivitet og geoakustiske parametre i studien, sett alle de tre områdene samlet. I Oslofjorden er korrelasjonen sterk mellom bunnreflektivitet og geoakustiske parametre. I Nordsjøen er denne variabel. Korrelasjonen mellom estimert kornstørrelse og tetthet er sterk ($r^2 = 0.46$) når det midles over de 20 øverste cm av kjernene fra Oslofjorden og Trøndelagskysten⁵⁹.
- Lydshastighet og tetthet i sedimentkjerner kan best vises som et eget lag i kartapplikasjoner med opplysning om hvilket dybdeintervall verdiene gjelder for.

⁵⁹ Estimert kornstørrelse er som nevnt i rapporten ikke pålitelig for Nordsjøen.

Anbefalinger:

- Det anbefales å teste ut nyeste versjon av FMGTo på EM 1002-dataene fra Nordsjøen for å se om effekten av forskjellige settinger under dataopptak kan fjernes, eventuelt reduseres. I så fall er det kanskje mulig å produsere kart over estimert kornstørrelse, og bunnreflektivitetskart uten manuell normalisering. I denne prosessen er kalibreringslinjene med EM 710 i 2017 nyttige for sammenligning.
- Det anbefales å teste ut om høyere oppløsning på de akustiske dataene fra Trøndelagskysten bedrer korrelasjonen mellom akustiske parametre og fysiske/geoakustiske parametre.
- Prosesseringen i FMGTo tar ikke hensyn til topografien, dette er en opsjon som har kommet til i nyere versjoner av Fledermaus, men er særdeles tidkrevende for store datamengder. Metoden er testet ut på mindre områder, og ser ut til å ha liten innvirkning på kartene som produseres (med den gitte oppløsningen). Det beste ville likevel vært å tatt inn en høyoppløselig terrengmodell (som Reference Grid) i FMGTo.
- Det synes viktig å bestemme kornstørrelsesfordelingen i overflatelaget, ikke bare for sedimentlaget like under, alternativt å kunne beskrive overflatelaget kvantitativt på tokt eller ut i fra fotografier. Innføring av standard metode og dybde for å ta utsnitt av grabbprøver og sedimentkjerner bør vurderes.
- Kornfordelingsanalyser bør standardiseres for nye sedimentprøver; forskjellige størrelser på sikter og oppløsning vanskeliggjør etter-analysen på kontoret. Det er dessuten viktig å måle hele kornfordelingskurven slik at midlere kornstørrelse kan beregnes.
- Målinger av lyd hastighet og tetthet i sedimentkjerner bør kvalitetssikres før nye kjerneprøver av havbunnen tas.
- FFI bør vurdere andre metoder for måling av lyd hastighet og tetthet i øvre sedimentlag enn innsamling av sedimentkjerner som er svært kostnadskrevede og dyrt å analysere i forhold til nytteverdien per i dag.
- Effekten av overflatelag med ulik beskaffenhet, tykkelse, lyd hastighet og tetthet bør modelleres akustisk på relevante frekvenser.
- På nye tokt bør det tas bunnprøver i områder der bunnreflektivitet og estimert kornstørrelse indikerer forskjellige bunntyper. Analyser av disse prøvene kan gi verdifull informasjon i forståelsen av metoden.

Referanser

- Ainslie, M., *Principles of Sonar Performance Modeling*. New York: Springer, 2010.
- Bachman, R. T., "Acoustic and physical property relationships in marine sediment", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 78 (2), ss. 616-621, 1985.
- Bhattacharyya, G. K. og Johnsen, R. A., *Statistical concepts and methods*: Wiley & Sons, 1977.
- Blott, S. J. og Pye, K., "Gradistat: A Grain Size Distribution And Statistics Package For The Analysis Of Unconsolidated Sediments", *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 26, ss. 1237-1248, 2001.
- Buckingham, M. J., "Compressional shear and wave properties of marine sediments: Comparisons between theory and data", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 117 (1), ss. 137-152, 2005.
- Eidem, E. J., "Tolkning av sedimentprøver fra Forsvarets øvingsfelt i nordlige Nordsjøen innsamlet 2004-2008", Forsvarets forskningsinstitutt FFI-rapport 2008/02041, 2008.
- Eidem, E. J., "Eksperimentrapport for CD&E 1446 Bunntyper Lybin", FFI-referanse 15/02101, 2015a.
- Eidem, E. J., "Studie i akustiske havbunnsmodeller og sammenligning av målt og predikert gjenklang og transmisjonstap i Nordsjøen (CD&E 1446)", FFI-rapport 2015/02068 (Begrenset), 2015b.
- Eidem, E. J., Henriksen, B., Ektvedt, K. W., Linnestad, S. L., og Hæger, M., "Alt-mulig-rartokt med M/S H.U. Sverdrup II i januar 2017 ", FFI-notat 17/0000 (i prosess), 2017.
- Eidem, E. J., Karlsen, A., Henriksen, B., Halvorsen, H., og Bjørneseth, G. J., "Havbunnskartlegging med FFIs forskningsfartøy M/S H.U. Sverdrup II – fra krav til ferdige kartprodukter", FFI-rapport 2014/00548, 2014a.
- Eidem, E. J. og Landmark, K., "Innsamling og beskrivelse av kjerneprøver og grabbprøver fra havbunnen i Forsvarets øvingsfelt i nordlige Nordsjøen 2004-2008", Forsvarets forskningsinstitutt, Norway FFI-rapport 2008/02035, 2008a.
- Eidem, E. J. og Landmark, K., "Seabed classification of the Navy's exercise area in the northern North Sea", Forsvarets forskningsinstitutt, Norway FFI-rapport 2008/02135, 2008b.
- Eidem, E. J. og Landmark, K., "Acoustic seabed classification using QTC IMPACT on single-beam echo sounder data from the Norwegian Channel, northern North Sea", *Continental Shelf Research*, vol. 68, ss. 1-14, 2013.
- Eidem, E. J., Plassen, L., Fjørtoft, J., Forsmo, V., Halvorsen, H., og Hæger, M., "Seabed sediment sampling outside Trøndelag – cruise report from 2013-DB6 with M/S H.U. Sverdrup II", FFI-rapport 2014/00862 (Unntatt offentlighet), 2014b.

EMODnet (2015). *European Marine Observation and Data Network*. Tilgjengelig: <http://www.emodnet-hydrography.eu>.

ESRI (2015). Tilgjengelig: www.arcgis.com.

Folk, R. L., "The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature", *Journal of Geology*, vol. 62 (4), ss. 344-359, 1954.

Fonseca, L. og Mayer, L., "Remote estimation of surficial seafloor properties through the application Angular Range Analysis to multibeam sonar data", *Marine Geophysical Researches*, vol. 28, ss. 119-126, 2007.

Goff, J. A., Olson, H. C., og Duncan, C. S., "Correlation of side-scan backscatter intensity with grain-size distribution of shelf sediments, New Jersey margin", *Geo-Marine Letters*, vol. 20 (43-49), 2000.

Haflidason, H., "Multi Sensor Core Logging and Grain Size Analyses of Core and Grab Samples from Oslofjorden", Department of Earth Science, University of Bergen, 2013.

Haflidason, H., "FFI Cores 2013 Trøndelag", Department of Earth Science, University of Bergen, 2014.

Haflidason, H., "Grain size analyzes", 2015.

Haflidason, H., Kjennbakken, H., Andersson, M., Vikebø, J. A., og Hope, V., "Multi Sensor Core Logging and Geotechnical Analysis of Marine Cores from the Norwegian Channel.", Department of Earth Science, University of Bergen, , Norway Report No. 100-02/08, 2008.

Haflidason, H., Vikebø, J. A., og Andersson, M., "Multi Sensor Core Logging and Geotechnical Analysis of Marine Cores from the Norwegian-Barents Seas. Report to Forsvarets forskningsinstitutt", Department of Earth Science, University of Bergen, , Norway Report No. 100-02/06, 2006.

Haflidason, H., Vikebø, J. A., og Hope, V., "Multi Sensor Core Logging and Grainsize Analysis of Cores from the Norwegian Channel & the Barents Sea. Report to Forsvarets forskningsinstitutt.", Department of Earth Science, University of Bergen, , Norway Report No. 100-03/07, 2007.

Hamilton, E. L., "Prediction of in-situ acoustic and elastic properties of marine sediments", *Geophysics*, vol. 36 (2), ss. 266-284, 1971.

Hamilton, E. L. og Bachman, R. T., "Sound velocity and related properties of marine sediments", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 72 (6), ss. 1891-1904, 1982 1982.

Hammerstad, E., "EM Technical Note: Backscattering and Seabed Image Reflectivity", 2000.

Hodges, R. P., *Underwater Acoustics - Analysis, Design and Performance of Sonar*. United Kingdom: Wiley, 2010.

-
- Jackson, D. R. og Richardson, M. D., *High-Frequency Seafloor Acoustics*. New York: Springer, 2007.
- Johnsen, R. A. og Wichern, D. W., *Applied multivariate statistical analysis*, 2nd utg. Prentice-Hall, 1988.
- Lurton, X., *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*: Springer-Praxis, 2002.
- Lurton, X. og Lamarche, G. E. Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and Recommendations [Online]. Tilgjengelig: <http://geohab.org/wp-content/uploads/2014/05/BSWG-REPORT-MAY2015.pdf>
- Lygren, T. H., "Betoniske foraminiferer og sedimentologi i overflateprøver fra nordøstlige Nordsjøen", Master, Universitetet i Bergen, 1984.
- McGonigle, C. og Collier, J. S., "Interlinking backscatter, grain size and benthic community structure", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 147, ss. 123-136, 2014.
- Medialdea, T., Somoza, L., León, R., Farrán, M., Ercilla, G., Maestro, A., Casas, D., Llave, E., Hernández-Molina, F. J., Fernández-Puga, M. C., og Alonso, B., "Multibeam backscatter as a tool for sea-floor characterization and identification of oil spills in Galicia Bank", *Marine Geology*, vol. 249, ss. 93-107, 2008.
- NGU, "Bunnsedimenter (kornstørrelse), regionalt", utg: Norges geologiske undersøkelse/MAREANO, 2015.
- QPS (2014). *Technical Note 4: Errors in older Kongsberg seabed imagery datagram*. Tilgjengelig: www.qps.nl.
- QPS (2015). Tilgjengelig: www.qps.nl.
- QPS, "Fledermaus v7.7.x Manual", utg: QPS, 2017.
- Richardson, M. D. og Briggs, K. B., "Relationships among sediment physical and acoustic properties in siliciclastic and calcareous sediments", i *ECUA*, 2004.
- Rise, L. og Brendryen, J., "Leirinnhold i jordarter - en sammenlignende studie med vekt på metodene Coulter Laser 200 og Sedigraph, og forslag til beregning av ekvivalent leirinnhold i prosent", NGU rapport 2013.012, 2013.
- Simpson, H. J., Houston, B. H., Liskey, S. W., Frank, P. A., Berdoz, A. R., Kraus, L. A., Frederickson, C. K., og Stanic, S., "At-sea measurements of sound penetration into sediments using a buried vertical synthetic array", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 114 (3), ss. 1281-1290, 2003.
- SNL. Store norske leksikon [Online]. Tilgjengelig: www.snl.no
- Urick, R. J., *Principle of underwater sound (3rd edition)*: McGraw-Hill, Inc, 1983.

Waite, A. D., *Sonar for Practising Engineers*, 3rd utg.: John Wiley & Sons Ltd, 2002.

Forkortelser

ARA	Angular Range Analysis
CD&E	Concept Development & Experimentation
FMGT _o	Fledermaus Geocoder Toolbox
MBES	Multibeam echo sounder (multistråle-ekkolodd)
MSCL	Multi Sensor Core Logger
NGU	Norges geologiske undersøkelse
PSV	Processing unit Software Version
UiB	Universitetet i Bergen

Vedlegg

A Teori

Sonarlikningen på sin enkleste form viser at ekkonivået EL (echo level) er lik kildenivået SL (source level) addert målstyrken TS (target strength) fratrukket to-veis propagasjonstap TL (transmission loss):

$$EL = SL - 2TL + TS. \quad (A.1)$$

Propagasjonstapet er gitt som

$$TL = 10 \log(R^2) + \alpha R, \quad (A.2)$$

der R er avstanden mellom kilde og mål i meter, og α er absorpsjonskoeffisienten i vann i dB/m (side 70 i Lurton (2002)).

Målstyrken gir et mål på hvor mye av innfallende intensitet I_i i en streifvinkel θ spres tilbake til kilden, og kan skrives som en funksjon av tilbakespredningsstyrken (bottom backscattering strength) $BBS_{\Omega A}$ og belyst areal A_s på havbunnen:

$$TS(\theta) = BBS_{\Omega A}(\theta) + 10 \log(A_s(\theta) / A_1), \quad (A.3)$$

der A_1 er enhetsarealet (1 m^2). Tilbakespredningsstyrken er per enhetsvinkel og per enhetsareal, og indeksene Ω og A benyttes her for å tydeliggjøre dette (side 391 i Ainslie (2010)).

Styrken på spredning fra havbunnen i en vilkårlig vinkel (bottom scattering strength, BSS) er gitt som (side 371 i Ainslie (2010)):

$$BSS_{\Omega A}(\theta_i, \theta_s, \phi) \equiv 10 \log \sigma_{\Omega A}(\theta_i, \theta_s, \phi), \quad (A.4)$$

der $(\theta_i; \theta_s, \phi)$ er henholdsvis streifvinkel for innfallende og spredt intensitet⁶⁰, og retning i horisontalplanet. Tilbakespredningsstyrken (i retning $\theta_s = \theta_i = \theta$, $\phi = \pi$ tilbake til kilden) blir

$$BBS_{\Omega A}(\theta) \equiv 10 \log \sigma_{\Omega A}(\theta). \quad (A.5)$$

$\sigma_{\Omega A}$ kalles differensielt spredningstverrsnitt per enhetsareal (differential scattering cross section per unit area). Spredningstverrsnittet σ har dimensjon areal (m^2) og er definert som forholdet mellom total spredt effekt og innkommende intensitet (side 40 i Ainslie (2010)):

⁶⁰ Begrepet streifvinkel brukes om vinkelen mellom lydbanen og havbunnen. Ved tilbakespredning i spekulær retning er streifvinkelen nær 90° . Innfallsvinkel brukes om vinkelen mellom lydbanen og linjen loddrett på havbunnen.

$$\sigma(\theta_i) = \frac{W}{I_i(\theta_i)} \quad \text{m}^2. \quad (\text{A.6})$$

Differensielt spredningstverrsnitt (spredningstverrsnitt per enhetsvinkel) kan skrives som

$$\sigma_{\Omega}(\theta_i, \theta_s, \phi) = \frac{W_{\Omega}(\theta_s, \phi)}{I_i(\theta_i)}, \quad (\text{A.7})$$

der W_{Ω} er “radian” intensitet, det vil si effekt per enhetsvinkel. Tilbakespredt intensitet måles i fjernfeltet, men refereres til typisk 1 m ved å justere for propagasjonstapet (side 167 i Hodges (2010)).

Spredningstverrsnittet er lik integralet over det differensielle spredningstverrsnittet:

$$\sigma(\theta_i) = \int \sigma_{\Omega}(\theta_i; \theta_s, \phi) \cos \theta_s \, d\theta_s \, d\phi = \int \sigma_{\Omega}(\theta_i; \Omega_s) \, d\Omega_s \quad (\text{A.8})$$

Spredningen fra et areal er proporsjonal med arealet og det er derfor naturlig å oppgi spredningstverrsnittet per enhetsvinkel (lik differensielt spredningstverrsnitt) og per enhetsareal:

$$\sigma_{\Omega A}(\theta_i; \theta_s, \phi) \equiv \frac{W_{\Omega A}(\theta_s, \phi)}{I_i(\theta_i)} = \frac{W_{\Omega}(\theta_s, \phi) / A_s}{I_i(\theta_i)}. \quad (\text{A.9})$$

Størrelsen som er dimensjonsløs, kalles også spredningskoeffisienten (scattering coefficient). Når streifvinkelen minsker, øker belyst areal av havbunnen og spredningskoeffisienten minsker.

Spredt effekt i retning $\theta_s = \theta_i = \theta$, $\phi = \pi$ tilbake til kilden kan skrives som spredt intensitet fra et enhetsareal, I_s , multiplisert med belyst areal:

$$W_{\Omega}(\theta) = I_s(\theta)A_s, \quad (\text{A.10})$$

slik at

$$\begin{aligned} \sigma_{\Omega}(\theta) &= \frac{I_s(\theta)A_s}{I_i(\theta)} \\ \sigma_{\Omega A}(\theta) &= \frac{\sigma_{\Omega}(\theta)}{A_s} = \frac{I_s(\theta)}{I_i(\theta)}. \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Dermed blir

$$\text{BBS}_{\Omega A}(\theta) = 10 \log \left(\frac{I_s(\theta)}{I_i(\theta)} \right) = 10 \log (\sigma_{\Omega} / A_s). \quad (\text{A.12})$$

I Waite (2002) brukes I_{scat} om tilbakespredt intensitet (gjenklang).

Innsatt i likning (A.3) kan målstyrken skrives på forskjellige former:

$$\begin{aligned} \text{TS} &= 10\log(\sigma_{\Omega} / A_s) + 10\log(A_s / A_1) \\ &= 10\log(\sigma_{\Omega} / A_1) \\ &= 10\log(\sigma_{\Omega A}) + 10\log(A_s / A_1) \\ &= 10\log\left(\frac{I_s}{I_i}\right) + 10\log(A_s / A_1). \end{aligned} \tag{A.13}$$

Målstyrken for enhetsarealet blir (side 238 i Urick (1983)):

$$\text{TS} = 10\log(\sigma_s(\theta) / A_1) = 10\log\left(\frac{I_s(\theta)}{I_i(\theta)}\right). \tag{A.14}$$

Volumspredning kan eventuelt omformuleres til å inkluderes i spredningskoeffisienten $\sigma_{\Omega A}$.

Flere modeller for tilbakespredningsstyrke er evaluert i Eidem (2015b). Den enkleste modell for tilbakespredningsstyrke er Lamberts regel (Ainslie, 2010):

$$\text{BBS}_{\Omega A}(\theta) = 10\log(\mu \sin^2(\theta)) = 10\log(\mu) + 20\log(\sin(\theta)), \tag{A.15}$$

der μ kalles Lamberts parameter og oppgis som $\text{BS}_0 = 10\log(\mu)$.

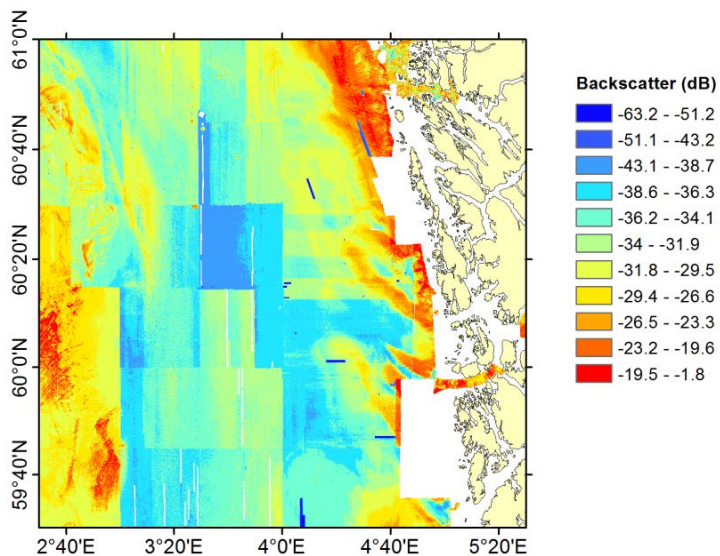
Målstyrken for et objekt med endelig utstrekning er definert som forholdet mellom reflektert og innfallende intensitet, i en enhetsavstand R_1 (side 291 i (Urick, 1983)):

$$\text{TS} = 10\log\left(\frac{I_r(\theta)}{I_i(\theta)}\right) = 10\log(\sigma_{\Omega}(\theta) / A_1) = 10\log(\sigma_{\text{bs}} / A_1). \tag{A.16}$$

Merk at I_r er reflektert intensitet fra hele objektet, mens I_s er spredt intensitet fra et enhetsareal. Begge størrelser måles i fjernfeltet, men refereres til en enhetsavstand.

For å bestemme refleksiviteten (backscatter), må den målte tilbakespredningsstyrken korrigeres for vinkel-avhengigheten. Kongsberg Maritime antar at vinkelavhengigheten følger Lamberts regel (Hammerstad, 2000).

B Bunnreflektivitet i Nordsjøen



Figur B.1 Kart over ikke-normalisert bunnreflektivitet i Nordsjøen. Fledermaus versjon 7.3.6a med oppløsning 5 m. Kartet viser bunnreflektivitet for hvert måleoppdrag før korrigering av nivået i ArcGIS. Omriss av de forskjellige måleoppdragene er lett å se for eldre data.

About FFI

The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) was founded 11th of April 1946. It is organised as an administrative agency subordinate to the Ministry of Defence.

FFI's MISSION

FFI is the prime institution responsible for defence related research in Norway. Its principal mission is to carry out research and development to meet the requirements of the Armed Forces. FFI has the role of chief adviser to the political and military leadership. In particular, the institute shall focus on aspects of the development in science and technology that can influence our security policy or defence planning.

FFI's VISION

FFI turns knowledge and ideas into an efficient defence.

FFI's CHARACTERISTICS

Creative, daring, broad-minded and responsible.

Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

FFIs FORMÅL

Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

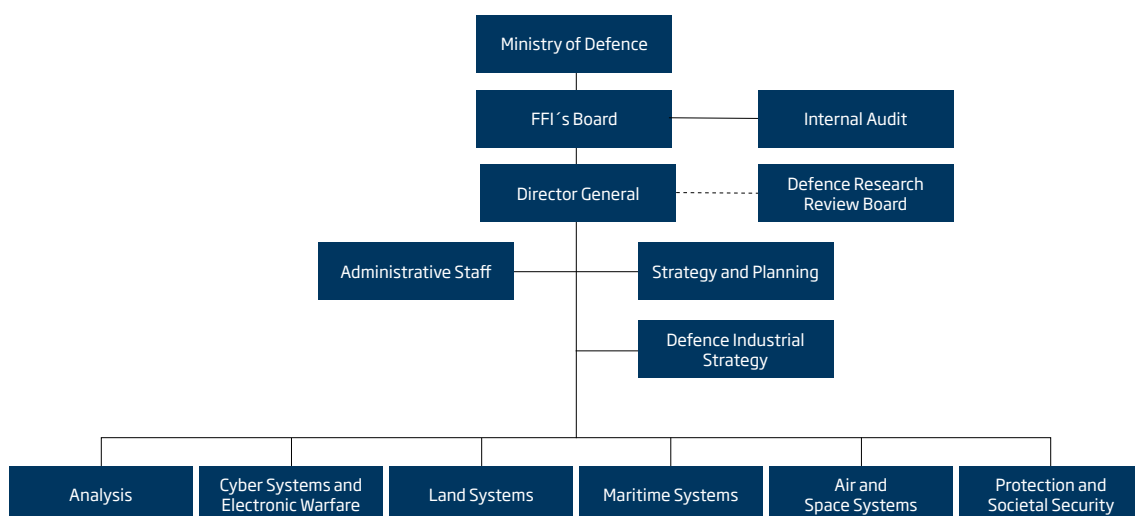
FFIs VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs VERDIER

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

FFI's organisation



Forsvarets forskningsinstitutt
Postboks 25
2027 Kjeller

Besøksadresse:
Instituttveien 20
2007 Kjeller

Telefon: 63 80 70 00
Telefaks: 63 80 71 15
Epost: ffi@ffi.no

Norwegian Defence Research Establishment (FFI)
P.O. Box 25
NO-2027 Kjeller

Office address:
Instituttveien 20
N-2007 Kjeller

Telephone: +47 63 80 70 00
Telefax: +47 63 80 71 15
Email: ffi@ffi.no