

# GEOLOGI FOR SAMFUNNET

*GEOLOGY FOR SOCIETY*



Rapport nr.: 2013.012		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen	
Tittel: Leirinnhold i jordarter - en sammenlignende studie med vekt på metodene Coulter Laser 200 og Sedigraph, og forslag til beregning av ekvivalent leirinnhold i prosent				
Forfatter: Leif Rise og Jo Brendryen		Oppdragsgiver: NGU		
Fylke:		Kommune:		
Kartblad (M=1:250.000)		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000)		
Forekomstens navn og koordinater:		Sidetall: 35	Pris: 110,-	
Feltarbeid utført:		Rapportdato: 4. mars 2013	Prosjektnr.: 311720	Ansvarlig: <i>Keidus Bøe</i>
Sammendrag:				
<p>Kornfordelingsanalyser på et utvalg sedimentprøver fra forskjellige steder i Norge (marine og glasimarine sedimenter) er utført på parallelle prøver ved hjelp av Sedigraph og Coulter LS200 laser (optisk modell 'Leire'). Sammenligning viser at leirinnholdet (&lt;2 µm) målt med Sedigraph er omkring firedobbelt av mengden målt med laser. Sedigraph viser også noe høyere verdier av mengde materiale &lt;20 µm. Leirinnholdet målt med Sedigraph samsvarer godt med prosent materiale &lt;9 µm målt med laser.</p> <p>Testing på et stort prøvesett (1200 prøver) indikerer at prosent materiale &lt;7,4 µm (målt med laser) representerer leirinnhold målt med sedimentasjonsmetoder. Den beste korreksjonsfaktoren kan variere fra jordart til jordart og fra område til område. For å minske muligheten for at leirinnholdet i enkelte prøver blir altfor høyt, eller i andre prøver for lavt, foreslår vi at ekvivalent leirinnhold basert på analyser med Coulter LS200 (optisk modell 'Leire') regnes ut som halve summen av den firedoble prosentverdien av materiale &lt;2 µm pluss prosent materiale &lt;7,4 µm:</p> <p>Ekvivalent leirinnhold ~ (4 x %&lt;2 µm + %&lt;7,4 µm)/2</p> <p>For minst 90% av marine og glasimarine sedimenter vil det ekvivalente leirinnholdet beregnet fra Coulter LS200 samsvare godt med målinger foretatt med pipetteanalyser eller andre metoder basert på sedimentasjonsprinsippet.</p> <p>Klassifikasjon av finkornige sedimenter er basert på et leirinnhold bestemt med tradisjonelle sedimentasjonsmetoder. Hvis kornfordelingen bestemmes med laser må ekvivalent leirinnhold beregnes.</p>				
Emneord: Maringeologi	Coulter LS200		Kornfordeling	
Metodestudie	Sedigraph		Ekvivalent leirinnhold	
Leirinnhold	Sedimentasjonsmetoder		Leir	

## INNHold

1.	FORORD / INNLEDNING.....	4
2.	METODER FOR BESTEMMELSE AV KORNFORDELING .....	6
2.1	Forbehandling av prøvematerialet .....	6
2.2	Manuelle metoder .....	7
2.3	Sedigraph .....	8
2.4	Coulter Laser .....	8
3.	SAMMENLIGNING AV METODER – NORSKE JORDARTER .....	10
3.1	Kornfordelingsanalyser ved NGI.....	10
3.2	Kornfordelingsanalyser ved NGU og andre institusjoner .....	11
3.2.1	Sammenligning av Sedigraph (NGU/UiB) og Coulter LS 200 (NGU) .....	12
3.2.2	Analyser med 'Falling drop' (NGI) og Coulter LS200 (NGU).....	14
3.2.3	Analyser med Hydrometer (NTNU) og Coulter LS200 (NGU) .....	15
4.	SAMMENLIGNING AV METODER - STUDIER I ANDRE LAND .....	16
4.1	Sedigraph versus Pipette.....	16
4.2	Coulter Laser versus Pipette .....	18
4.3	Coulter laser versus Hydrometer .....	22
5.	DISKUSJON .....	22
5.1	Klassifikasjonssystemer og leirinnhold .....	22
5.2	Forslag til korreksjon av leirinnholdet målt med Coulter LS200 - modell 'Leire' .....	23
6.	ANBEFALINGER FOR VIDERE KORNFORDELINGSTUDIER VED NGU .....	27
7.	KONKLUSJONER .....	28
8.	REFERANSER .....	30

## VEDLEGG

VEDLEGG 1. PROSEDYREBESKRIVELSE COULTER LASER 200 (NGU)

VEDLEGG 2. PROSEDYREBESKRIVELSE SEDIGRAPH III V1.04 (UIB)

## 1. FORORD / INNLEDNING

Kornfordelingsanalyse blir benyttet som standard metode for å beskrive og klassifisere sedimenter innenfor både maringeologi og terrestrisk kvartærgeologi. I tillegg til den generelle dokumentasjonen som en kornfordelingsanalyse representerer, vil et sediments innhold av de fineste kornstørrelsene, leir og silt, ha vesentlig betydning for sedimentets geotekniske egenskaper (fundamentering, setning, stabilitet, etc.) og vurdering av andre egenskaper i bygg- og anleggsteknisk sammenheng (f.eks. telefare, erosjonsfare, egnethet som tilslag i forskjellige produksjonsprosesser). Geologer benytter resultater fra kornfordelingsanalyser for klassifisering av jordarter (terminologi) og som et viktig hjelpemiddel for tolkning av avsetningsprosesser. Organisk og uorganisk forurensing knyttet til menneskelig aktivitet binder seg lettere til de fineste mineralpartiklene, og innhold av leir og fin silt har betydning for evaluering av miljøkjemiske resultater.

Ved NGU ble tidligere både Pipette- og Hydrometermetoden benyttet som for analyser av kornstørrelser mindre enn 0,063 mm (63  $\mu\text{m}$ ), dette i kombinasjon med våtsikting for å separere korn større enn 63  $\mu\text{m}$  (egentlig 62,5  $\mu\text{m}$ ). Etter anskaffelse av elektronisk analyseapparat av fabrikat Sedigraph 5100 (basert på røntgenstråling gjennom suspendert materiale <63  $\mu\text{m}$ ) og Coulter LS200 (optisk metode med laserlys) ble de arbeidskrevende manuelle metodene forlatt omkring 1990. De moderne metodene kunne tilby mye kortere analysetider og høyere reproduserbarhet.

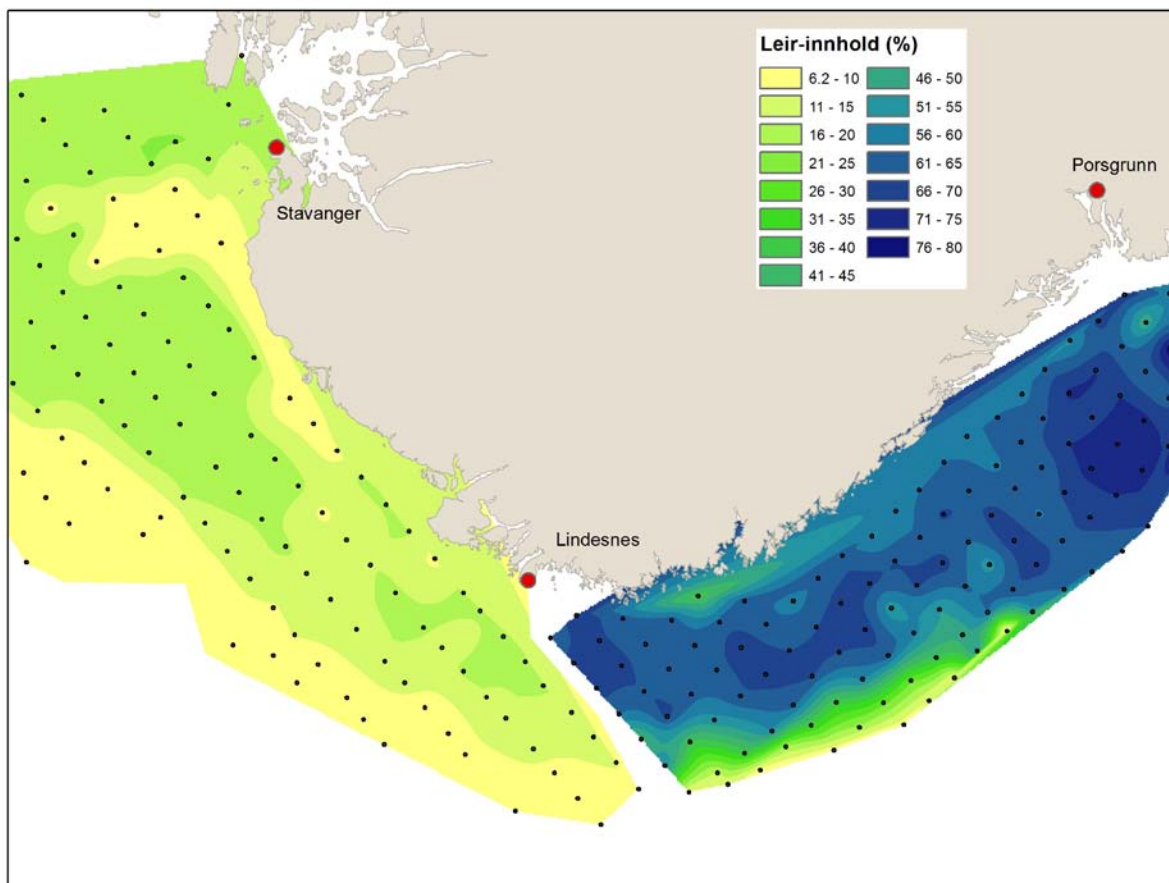
I likhet med Pipette og Hydrometer ble Sedigraph benyttet i kombinasjon med sikting av de groveste fraksjonene (>63  $\mu\text{m}$ ), mens sikting av materiale >0.5 mm ble anvendt for laserdiffraksjon. Ved NGUs laboratorium (NGU Lab) ble etter hvert Sedigraph gradvis avviklet som metode, sannsynligvis fordi Coulter LS200 viste seg som den overlegent mest kostnadseffektive metode for bestemmelse av partikkelfordeling i finkornige sedimenter. Coulter LS200 er enkel og rask å benytte i praksis, og gir høy reproduserbarhet. Ved NGU analyseres 1000-1500 prøver i året med denne metoden. Sedigraph har lavere reproduserbarhet og er mere arbeidskrevende, men det er ikke kjent at det ble gjort noen faglig evaluering før utfasing av metoden på NGU.

Det meste av referansebakgrunn og jordartsterminologi for finkornige sedimenter er basert på sikting (>63  $\mu\text{m}$ ) i kombinasjon med sedimentasjonsanalyse hvor Stokes lov ble benyttet for å regne ut kornstørrelse (Hydrometer, Pipette, Falling drop). Falling drop er en mindre kjent metode basert på sedimentasjonsprinsippet. Norges Geotekniske Institutt (NGI) har benyttet metoden i snart 50 år, og det foreligger en stor mengde analyser utført med denne metoden av norske jordarter, både på land og 'offshore'.

Sedigraph er også basert på sedimentasjonsprinsippet, og gir et innhold av leir (<2  $\mu\text{m}$ ) som er noe høyere eller relativt lik prosentverdiene bestemt med Pipette eller Hydrometer (omtalt senere). Metoden er fortsatt i utstrakt bruk ved universiteter og institusjoner i Norge. Laseranalyser av kornfordeling gir sammenlignet med de andre metodene et langt lavere

leirinnhold, og tilsvarende mye høyere prosentverdier av silt (hovedsakelig i finsiltfraksjonen 2-8  $\mu\text{m}$ ). Det lave leirinnholdet har ført til faglig forvirring og forringelse av kommunikasjon med hensyn til både terminologi og jordartsforståelse, både blant geologer og annet geopersonell som jobber med stabilitet- og skredproblematikk.

NGUs maringeologiske kartlegging i sørlige Norskerenna demonstrerte med tydelighet hvor viktig kornfordelingsmetoden er for kvantifisering av leir og silt. I Skagerrak-prosjektet (Bøe, 1995; Longva og Thorsnes, 1997), der kornfordelingsanalyser ble utført med Sedigraph 5100, ble det i den dype delen av Norskerenna sør for Lindesnes målt over fire ganger så høyt leirinnhold som på nabostasjonene i vest hvor Coulter LS200 ble benyttet (Bøe et al., 1997). Figur 1 er et kart som viser leirinnholdet i bunnsedimentene i sørlige del av Norskerenna. De homogene sedimentasjonsforholdene langs dypålen i Norskerenna viste klart at dette var et uakseptabelt metodeavvik, noe som også ble kommentert av Bøe et al. (1997).



Figur 1. Innhold av leir (%) i bunnsedimentene (2-5 cm dyp) i sørlige Norskerenna. Øst for Lindesnes er kornfordelingsanalysene utført med Sedigraph (Bøe, 1995), mens prøvene i vest ble analysert med Coulter LS200 (Bøe et al., 1997). 'Nabo-prøver' i vest (sør for Lindesnes) tydet på at Sedigraph målte minst 4 ganger så høyt leirinnhold som Coulter LS200.

Ved overgang fra pipetteanalyser til Sedigraph ved NGU Lab ble det ikke utført noen sammenlignende studie på naturlige jordarter. Etter innkjøp av Coulter LS200 i 1995 ble det

utført analyser av standarder laget av nedknuste mineraler, men ingen sammenlignende metodestudier av finkornige sedimenter fra Norge. Det lave innholdet av størrelsesfraksjonen leir i kohesive sedimenter, som både visuelt (basert på oppførsel), og tester i laboratoriet, ble oppfattet som 'feite' leirer, ga særlig frustrasjon for forskere som jobbet med leirskred.

I etterkant av en litteraturoppgave ved NTNU med tema 'Kornfordeling av finkornige sedimenter' (Bargel, 2001), leverte forsker Terje Bargel ved NGU to prøveserier til NGU Lab for sammenligning av metodene Sedigraph 5100 og Coulter LS200. Materialet omfattet 50 prøver fra det undersjøiske skredområdet i Finneidfjord og 13 prøver fra diverse steder i Norge (både sjø og land; for referanse til rapporter, se Tabell 1). Dessverre har analyserapportene blitt liggende i NGUs arkiv og resultatet av disse undersøkelsene har derfor vært ukjent for de fleste forskere ved NGU.

I denne rapporten blir disse prøveseriene sammenstilt med nye analyser fra en 12 m lang kjerne av marine og glasimarine sedimenter fra øvre del av kontinentalskråningen utenfor Vesterålen (Rise et al., 2012). Jo Brendryen ved Universitetet i Bergen har utført målinger med SediGraph III V1.04 (Micromeritics Instrument Corporation) på forskjellige nivå i denne kjernen, mens NGU Lab har analysert med laser (Coulter LS200) på parallelle prøver tatt på nøyaktig samme dyp (19 prøver). I rapporten omtaler vi også noen prøver fra Nidelvdeltaet (Trondheimfjorden) hvor det er utført Coulter LS200 ved NGU og Hydrometeranalyse ved NTNU, og noen prøver fra Finneidfjord hvor det er utført både lasermålinger (NGU) og analyser med Falling drop (NGI).

Motivasjonen for denne sammenstillingen av data er å finne en tommelfingerregel for å kunne korrigere leirinnholdet bestemt med Coulter LS200, slik at det samsvarer bedre med analyser utført med metodene Sedigraph, og med Pipette/Hydrometer/Falling drop. Målet er å bedre kommunikasjonen mellom geo-personell som benytter forskjellige kornfordelingsmetoder for partikkelkarakterisering, og gjøre det mulig å utføre en mer enhetlig klassifisering av finkornige jordarter som samsvarer bedre med de tradisjonelle manuelle metodene. De tradisjonelle metodene er benyttet gjennom 100 år, og representerer databasen som jordartsterminologi og mange egenskaper ved sedimentene er tuftet på.

## **2. METODER FOR BESTEMMELSE AV KORNFORDELING**

### **2.1 Forbehandling av prøvematerialet**

Forbehandlingen av prøvematerialet kan variere noe, men stort sett følger forskjellige laboratorier etablerte retningslinjer og/eller prosedyrer anbefalt av utstyrproducenter. I Vedlegg 1 beskrives kort prosedyrene som benyttes ved NGU Lab (Coulter LS200) og ved sedimentlaboratoriet ved Universitetet i Bergen (SediGraph III V1.04). Tidligere analyser med Sedigraph 5100 ved NGU er utført etter omtrent samme prosedyrer som er benyttet ved UiB.

## 2.2 Manuelle metoder

De tradisjonelle metodene baserer seg på sedimentasjonsprinsippet og Stokes lov (hydrometernmetoden, pipettemetoden, Falling drop). Stokes lov beskriver kuleformete partiklers fallhastighet i en væske, og kan uttrykkes forenklet som:

$$V = CD^2 \text{ (i cm/sek);}$$

der  $V$  er kulenes fallhastighet,  $C$  er en væsketype-, partikkeltetthet- og temperaturavhengig konstant, og  $D$  er kulenes diameter. Ved oppslemming i vann har det vist seg empirisk at denne formelen bare gjelder for runde partikler som er mindre enn 0,1-0,2 mm.

Fallhastigheten til større partikler er lavere enn beregnet ved Stokes lov, sannsynligvis fordi det oppstår turbulens som bremser fallet. Fallhastigheten avtar også ved økende materialmengde i suspensjonen p.g.a. kollisjoner mellom partiklene. Små prøvemengder og utsikting av materiale større enn 63  $\mu\text{m}$ , som er standard prosedyre, reduserer disse feilkildene.

De fleste naturlige sedimenter oppfyller ikke betingelsen i Stokes lov med hensyn til kornform. Dette gjelder spesielt for sedimenter med stort innhold av leirmineraler. I slike tilfeller vil avviket fra idealforholdene kunne bli betydelige i en analysesituasjon. Flakformede leirmineraler holder seg i suspensjon lengre enn kuler med samme vekt. For prøver med stort innhold av leirmineraler, f.eks. marine leirer, vil derfor fallhastigheten være mindre enn hva Stokes lov sier. Som en konsekvens av dette vil en kornfordelingsanalyse gi overrepresentasjon av leirfraksjonen på bekostning av silt, noe som er påpekt bl.a. av Loveland & Whalley (1991). Som et konkret eksempel på dette kan nevnes at Konert & Vandenberghe (1997) ut fra SEM-fotografier har påvist at partikler som i følge Stokes lov sedimenterte som 1-2  $\mu\text{m}$  store partikler var tynne flak med diameter opp til 10  $\mu\text{m}$ . Konert & Vandenberghe (1997) summerer opp forutsetningene sedimentasjonsmetoden bygger på, og som representerer feilkilder i ulik grad, som følgende:

- Sedimentasjonshastigheten er konstant og ikke for hurtig for at ikke turbulens skal oppstå omkring partiklene.
- Partiklene er faste og glatte kuler.
- Tettheten til partiklene er som for kvarts; 2,65  $\text{g/cm}^3$ .
- Ingen kontakt mellom partiklene eller mellom partiklene og sedimentasjonssylinderen.
- Partiklene påvirker ikke viskositeten til væsken.

## 2.3 Sedigraph

Sedigraph baserer seg også på sedimentasjonsprinsippet, og resultatene kan derfor best sammenlignes med pipettemetoden og andre klassiske metoder, som baserer seg på det samme prinsippet.

Teknikken går ut på at en røntgenstråle sendes gjennom det suspenderte prøvematerialet. Tettheten av suspensjonen endrer seg etter hvert som partiklene sedimenteres og konsentrasjonen ved et gitt dyp etter en viss tid registreres. Kornstørrelsesfordelingen i suspensjonen beregnes ut fra dette (Norges Geotekniske Institutt, 1986).

Sedigraph kan analysere fraksjoner fra 100  $\mu\text{m}$  til 0,1  $\mu\text{m}$ . Instrumentet er best egnet til sandfritt materiale (Coates & Hulse, 1985). Grovere materiale, i praksis det som er grovere enn 63  $\mu\text{m}$ , bestemmes ved vanlig sikteanalyse. Jern er en sterk absorbent av røntgenstråler og vil derfor påvirke tolkningen av partikkeltetthet i suspensjonen. Sedimenter med mye jern i leir-/finsilt-fraksjonen vil derfor kunne få for høyt innhold av disse partikkelstørrelsene (Buchan et al., 1993).

## 2.4 Coulter Laser

Kornfordelingsanalyse med instrumenter som benytter monokromatisk laserstråling har vært i bruk et noen tiår. Metoden baserer seg på en suspensjons evne til å avbøye kortbølget elektromagnetisk stråling (laserdiffraksjon), en egenskap som varierer med kornstørrelsen og kornformen til partiklene i suspensjonen. Det er flere produsenter som markedsfører instrumenter, og versjoner av samme utstyr med forskjellig oppløsning (antall målekanaler som korresponderer med kornstørrelse). Måleprinsippene er de samme, men i en metodesammenligning med 10 instrumenter og 4 jordarter synes de fire laserinstrumentene som ble testet å gi noe forskjellig resultat (Goosens, 2008). Noe av forskjellene skyldes sannsynligvis at minste partikkelstørrelse som måles varierer (0,01-0,4  $\mu\text{m}$ ). Coulter laser må ikke forveksles med Coulter Counter som baserer seg på et måleprinsipp som av enkelte vurderes som uegnet for kornfordelingsanalyser av leirrike jordarter (Norges Geotekniske Institutt, 1986).

Coulter LS200 egner seg ifølge produsenten best for bestemmelse av kornstørrelser i området 0,4  $\mu\text{m}$  til 500  $\mu\text{m}$  (kan benyttes opp til 2000  $\mu\text{m}$ ). Prøvematerialet slemmes opp i vann, tilsettes dispergeringsmiddel, og plasseres i apparatet. En laserstråle sendes gjennom en oppoverstrømmende suspensjonsstrøm og vil brytes i bestemte vinkler avhengig av størrelsen på partiklene. Vinkelen på de brutte strålene registreres av opp til 130 detektorer ("kanaler"), som korresponderer med gitte partikkelstørrelser. Intensiteten som registreres av de korresponderende detektorer er relatert til antall partikler med gitt størrelse. Kornfordelingen bestemmes med dette på volumbasis. Under antagelse av at mineralkornene i de forskjellige

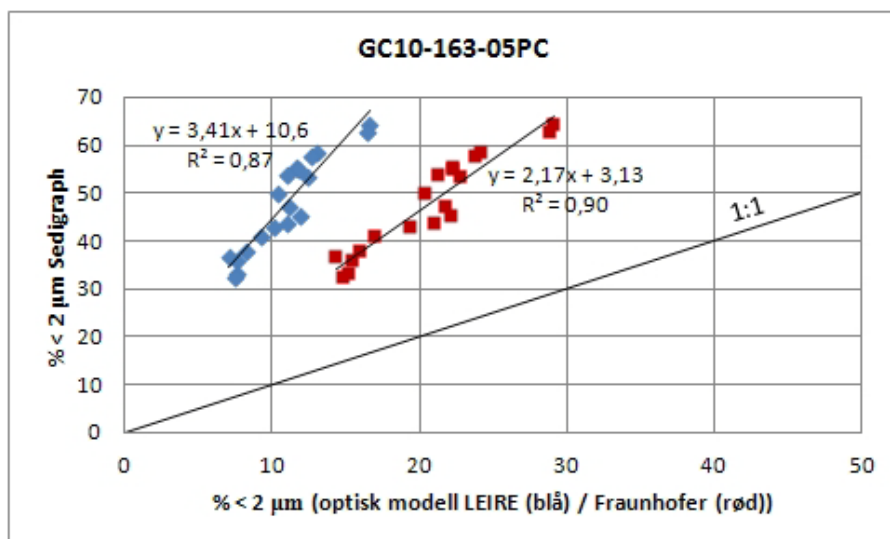


fraksjonene har samme tetthet, vil kumulativ volumprosent være identisk med kumulativ masseprosent.

Metoden er rask og enkel, og har høy reproduserbarhet. Flakformete partikler (leirmineraler), der partikkelstørrelsen varierer etter orienteringen av partiklene i forhold til laserstrålen, vil bli registrert med en gjennomsnittsverdi under antakelse at diffraksjonen er forårsaket av sfærisk kornform ("optisk diameter"). Resultatet vil derfor bli underrepresentasjon av det fineste materialet i forhold til metodene som er basert på sedimentasjonsprinsippet (Loizeau et al., 1994; Konert & Vandenberghe, 1997).

Det teoretiske grunnlaget for metoden er komplisert, og evaluering av analyseresultatene kompliseres ytterligere ved at to forskjellige optiske modeller blir benyttet (Fraunhofers diffraksjonsteori og Mies teori). Ifølge Konert & Vandenberghe (1997) er Fraunhofers teori godt egnet for ikke-sfæriske leirpartikler. Mies teori er mindre egnet da denne måler alt for lavt leirinnhold. de Boer et al. (1987) er imidlertid av den oppfatning at heller ikke Fraunhofers teori er nøyaktig nok for bestemmelse av leirfraksjonen. De mener resultatene blir unøyaktige for partikler under  $10 \lambda$  ( $\lambda$ , laserlysets bølgelengde). Loizeau et al. (1994) påpeker at Fraunhofers teori gir en gradvis økende feil i beregnede prosentverdier ved minkende kornstørrelser under  $7 \mu\text{m}$ . Både Beuselinck et al. (1998) og Loizeau et al. (1994) konkluderer med at Fraunhofers teori overestimerer leirfraksjonen sammenlignet med Mies teori. Disse forskerne har også benyttet Fraunhofers teori, fordi denne modellen gir minst avvik fra den tradisjonelle pipette-metoden. Vandecasteele & de Vos (2001) oppgir i tillegg en annen begrunnelse for å anvende Fraunhofers teori, nemlig at kjennskap til refraksjonsindekser er nødvendig for å gjøre gode beregninger med Mies teori. Jordartene består som kjent av en komplisert blanding av forskjellige mineraler som hver har sine spesifikke refraksjonsindekser.

En spørreunde ved NGU indikerte at flere brukere faktisk ikke er klar over at Coulter LS200 kan kjøres med to alternative innstillinger. NGU Lab har hatt som standard praksis å benytte optisk modell "Leire" (Mies teori) ved analyse av finkornige leirholdige jordarter, og da benyttes homogen refraksjonsindeks 1,65 (gjennomsnitt leirmineraler). Prøver fra den 12 m lange kjernen GS10-163-05PC ble kjørt med begge modeller, og Fig. 2 viser at modell "Leire" ga et leirinnhold ( $<2 \mu\text{m}$ ) som er 8-12 prosent lavere enn modell Fraunhofer. Resultatet fra begge modeller viser imidlertid at lasermålinger gir et langt lavere leirinnhold enn målinger med Sedigraph.



Figur 2. Leirinnhold bestemt med Coulter LS200 (NGU; beregnet for to forskjellige optiske modeller) versus leirinnhold målt med Sedigraph (Universitetet i Bergen). Analysene er foretatt på parallelle prøver av en 12 m lang kjerne fra øvre del av kontinentalskråningen utenfor Vesterålen. Laser, særlig optisk modell "leire", gir meget lavt innhold av fraksjonen leir (<2 μm) sammenlignet med Sedigraph. Optisk modell 'Leire' (Mies teori) benyttes på finkornige sedimenter ved NGU Lab.

### 3. SAMMENLIGNING AV METODER – NORSKE JORDARTER

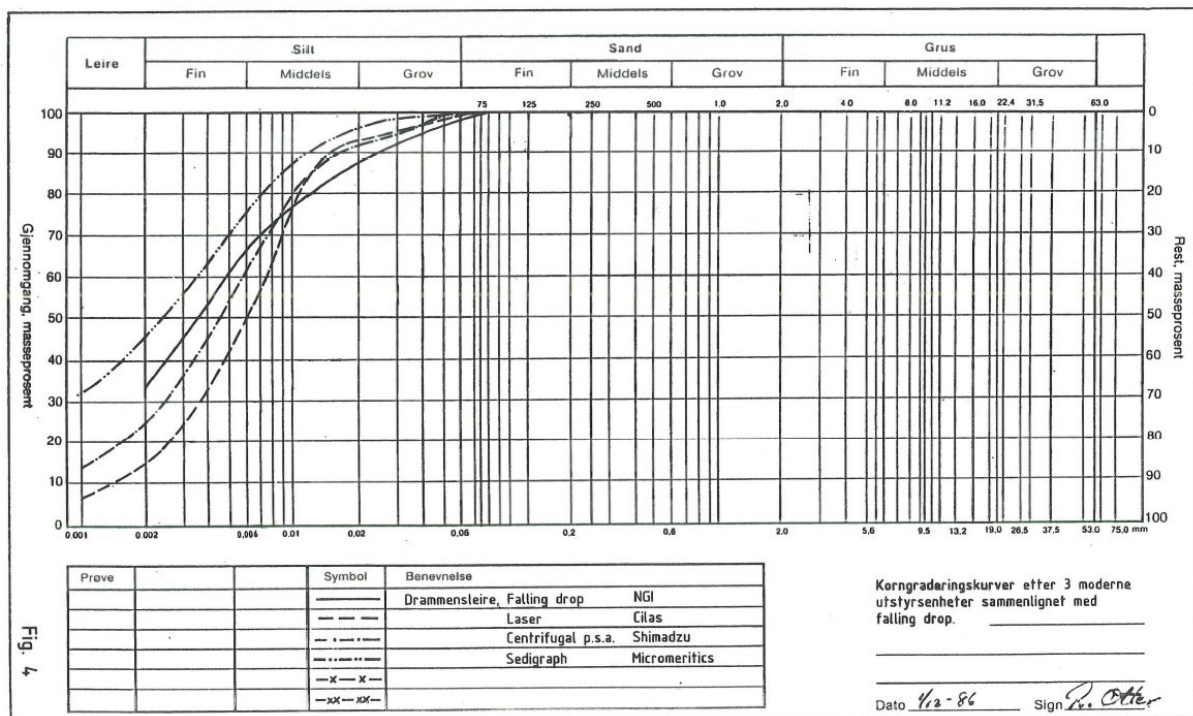
Av sammenlignende metodeundersøkelser på naturlige norske jordarter har vi kun kjennskap til en intern studie ved NGI (Norges Geotekniske Institutt, 1986). Det kan imidlertid ikke utelukkes at det finnes interne studier ved høyskoler/universiteter og/eller institusjoner/konsulenter som ikke har blitt 'fanget opp' av det litteratursøket som ble gjort i forbindelse med denne rapporten.

#### 3.1 Kornfordelingsanalyser ved NGI

Den interne studien (Norges Geotekniske Institutt, 1986) ble utført i forbindelse med et eventuelt innkjøp av moderne utstyr som kunne erstatte Falling drop, en analysemetode som hadde vært i bruk ved NGI i 20 år (i 1986). Den homogene (standard) Drammensleiren som kun har noen få prosent i sandfraksjonen ble valgt som testmateriale. Det ble først gjort en ringtest av tradisjonelle metoder som var i bruk ved forskjellige institusjoner: NGI – Falling drop og Pipette; NTH (nå NTNU) – Falling drop og Hydrometer; Veglaboratoriet – Hydrometer; konsulentfirmaet Noteby – Hydrometer. Selv om disse metodene er relativt operatør-avhengige viste ringtesten et noenlunde brukbart samsvar. Innhold av leir varierte fra 41% (Pipette; NGI) til 33% (Hydrometer; Veglaboratoriet).

Standard Drammensleire ble også testet med moderne analyseutstyr; Laser partikkelteller (Cilas granulometer 715), Centrifugal p.s.a. (Shimadzu) og Sedigraph 5000 ET (Micromeritics). Disse nye analysemetodene viste en langt større spredning av kornfordelingsgrafene enn de tradisjonelle metodene. Høyest leirinnhold (46%) ble målt med Sedigraph, mens den laveste verdien ble målt med laser (14%) (Fig. 3).

Sedigraph som baserer seg på sedimentasjonsprinsippet samsvarer best med teknikkene Pipette, Hydrometeranalyse og Falling drop ((Norges Geotekniske Institutt, 1986). Dette blir av NGI ansett som viktig da geotekniske beregninger bygger på disse metodene. Det uttrykkes imidlertid noe bekymring over at metoden systematisk viser for høye verdier når finkornige jordarter analyseres. Dette ble dokumentert av en forsøksserie med 37 prøver som ble kjørt både på Falling drop og Sedigraph (Norges Geotekniske Institutt, 1986). De kumulative kurvene fra Sedigraph lå gjennomgående 6-10% over kurvene fra Falling drop. Falling drop er fortsatt (2013) i utstrakt bruk ved NGI.



Figur 3. Kornfordelingsanalyser av 'standard Drammensleire' utført med fire forskjellige metoder. Sedigraph ga høyeste innhold av leir (ca. 46%), mens lasermålinger ga den laveste (ca. 14%) (etter Norges Geotekniske Institutt, 1986).

### 3.2 Kornfordelingsanalyser ved NGU og andre institusjoner

På to av datasettene som inngår i denne sammenlignende undersøkelsen er både Coulter LS200 og Sedigraph 5100 utført ved NGU. Det tredje datasettet som inngår ble analysert med Sedigraph ved Universitetet i Bergen (UiB). Det inngår også noen andre datasett (Tabell 1) fra Trondheimsfjorden nær utløpet av Nidelva (Coulter LS200 versus Hydrometer) og fra

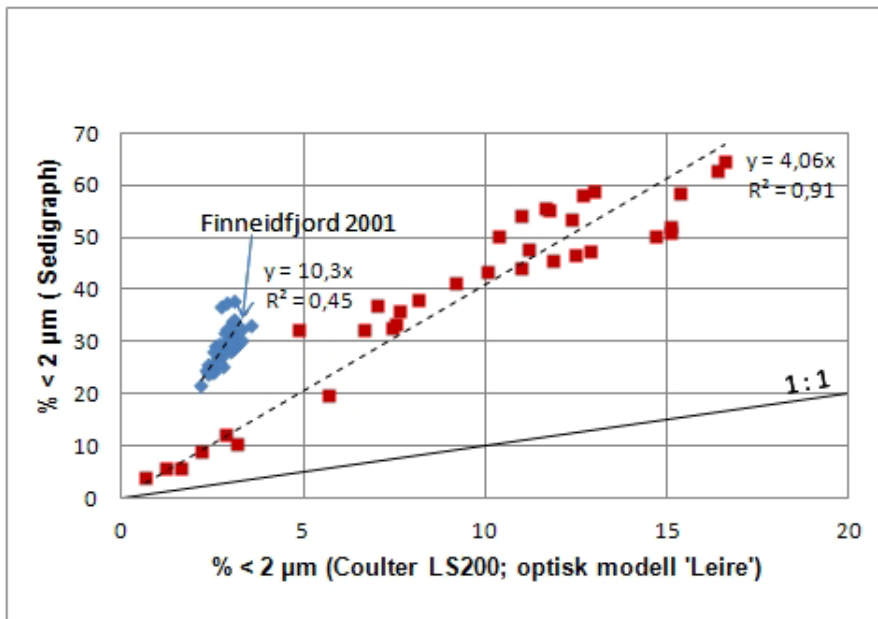
Finneidfjorden (Coulter LS200 versus Falling drop). Resultatene er plottet i diagrammer eller som er kommentert/diskutert i rapporten.

**Tabell 1. Datasett benyttet ved sammenligning av analysemetoder**

Område	Analyse rapport	Metode	Optisk modell	Comment
Finneidfjord	NGU 2001.0187	Sedigraph (NGU)	-	50 prøver (P9803 osv.)
Finneidfjord	NGU 2001.0185	Coulter Laser	Leire	50 prøver
Både land og sokkel	NGU 2002.0113	Coulter Laser	Leire +Fraunhofer	13 prøver (Bargel)
Både land og sokkel	NGU 2002.0113	Sedigraph (NGU)		13 prøver (Bargel)
Vesterålen	NGU 2012.0262	Coulter Laser	Leire+Fraunhofer	19 prøver GS10-163-05PC
Vesterålen	UiB 2012 (upubl.)	Sedigraph (UiB)	-	19 prøver GS10-163-05PC
Barentshavet Prosj.294800	NGU 2001.0518	Sedigraph (NGU)	-	3 prøver (1244_osv)
Barentshavet Prosj.294800	NGU 2001.0518	Coulter Laser	Leire	3 prøver (1244_osv). Totalt 67 prøver
Trondheimsfjorden	NGU 2009.0257	Coulter Laser	Leire	12 prøver (kjerne 0601012)
Trondheimsfjorden	Vingerhagen, Master NTNU	Hydrometer	-	12 prøver (kjerne 0601012)
Finneidfjord	NGU 2011.0370	Coulter Laser	Leire	5 prøver GS10-163-02PC
Finneidfjord	NGI 2012 (upubl.)	Falling drop	-	5 prøver GS10-163-02PC

### 3.2.1 Sammenligning av Sedigraph (NGU/UiB) og Coulter LS 200 (NGU)

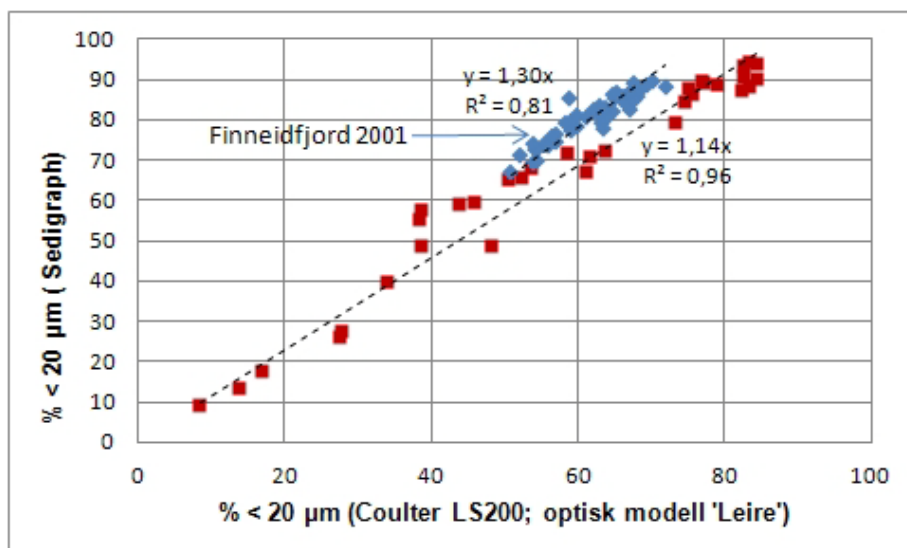
Alle analyserapporter som inneholder data på prøver (fra samme prøvenivå) bestemt med både Sedigraph og Coulter LS200 er lagt inn i samme regneark for enklere å kunne behandle data. Ser vi bort fra prøvesettet fra Finneidfjord 2001 viser plotting av leirfraksjonen (<2 µm) en klar trendlinje (Fig. 4). Leirinnholdet målt med Coulter LS200 (optisk modell 'leire') er kun omkring 25% av Sedigraph-verdiene. Datasettet fra skredområdet i Finneidfjord indikerer homogene sedimenter, men det er et skremmende stort avvik i resultater. De 50 prøvene viser 2-3,5% leir (<2µm) med laser kjørt med optisk modell 'Leire' (som anbefales av NGU Lab), mens Sedigraph viser 21-37% leir (d.v.s. 10 ganger så høye verdier som lasermålingene).



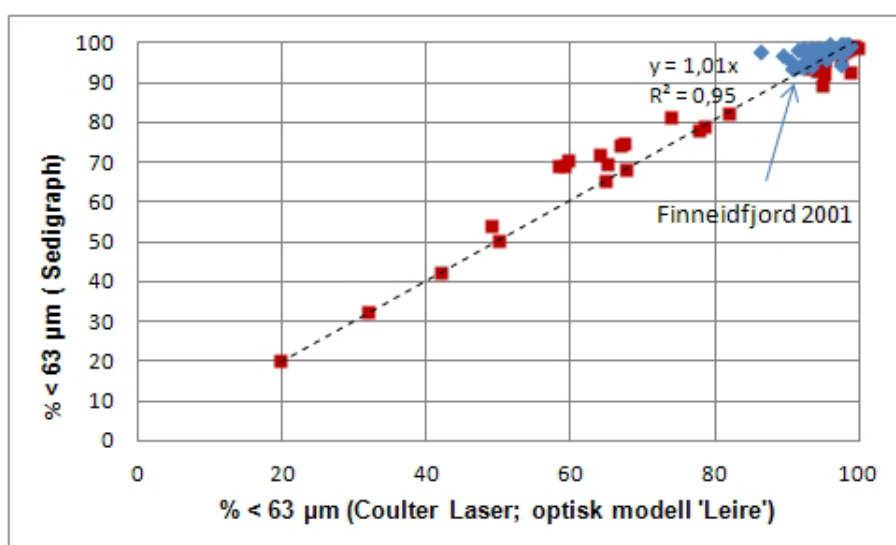
Figur 4. Mengde leir målt med Coulter LS200 (optisk modell 'Leire') og Sedigraph. Analyser på parallelle prøver fra flere datasett (se Tabell 1). Prøvene fra Finneidfjord (50 stk., blått symbol) faller utenfor den generelle trenden, og leirinnholdet bestemt med Sedigraph er omkring 4 ganger høyere enn lasermålingene.

Figur 5 viser mengde materiale  $< 20 \mu\text{m}$  (d.v.s. partikler finere enn grov silt). Her ser vi at Coulter LS200 måler 10-25% lavere verdier enn Sedigraph. Prøvene fra Finneidfjord plotter mye nærmere de øvrige datasettene, men viser fortsatt størst metodeavvik. Som forventet blir det langt bedre samsvar mellom metodene når en plotter materiale finere enn  $63 \mu\text{m}$  (Fig. 6).

Et annet datasett utført på prøver fra Finneidfjord som ligger i samme område som 2001-prøvene (NGU Lab-rapport 2005.0049), indikerer at det lave leirinnholdet (laser) ikke skyldes en systematisk feil p.g.a. preparering av prøvene før analysen eller feil ved instrument. På 2005-datasettet (61 prøver) ble leirinnholdet målt til 2-5% med Coulter LS200 (gjennomsnitt 3,4%). Målinger med Sedigraph ble ikke utført på dette datasettet.



Figur 5. Mengde partikler <20 µm målt med Coulter LS200 (optisk modell 'Leire') og Sedigraph. Analysene er gjort på parallelle prøver (flere datasett, se Tabell 1). Trendlinjene viser at Sedigraph måler for høye verdier også ved denne kornstørrelsen (over 1:1 linjen som er diagonalen i diagrammet).

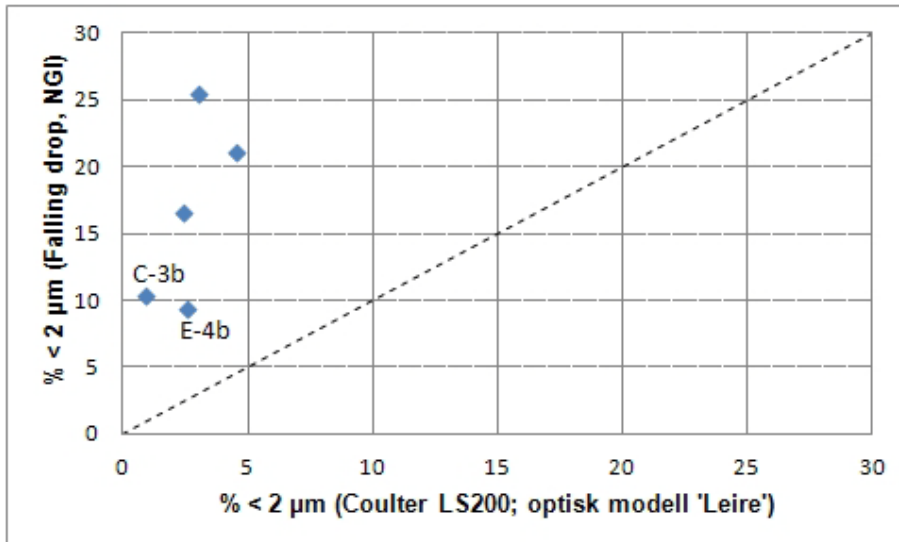


Figur 6. Mengde partikler <63 µm bestemt med Coulter LS200 (optisk modell 'Leire') og våtsikting av materiale <0,5 mm. Prosent <63 µm ble bestemt ved våtsikting før kjøring av Sedigraph.

### 3.2.2 Analysen med 'Falling drop' (NGI) og Coulter LS200 (NGU)

I den lange kjernen GS10-163-01 (skredområde Finneidfjord) ble det tatt ut 5 parallelle prøver for analyser med Falling drop (NGI) og Coulter LS200 (NGU). Prøvene ble tatt rundt 2,5 m dyp i kjernen, nær glideplanet for et skred observert på høyoppløselig seismikk. To av prøvene (C-3b) og E-4b) var fra et tynt sandig/siltig/leirig lag, som var mye grovere enn den siltige leiren omkring. Analyser viste at Falling drop ga et mye høyere leirinnhold enn Coulter

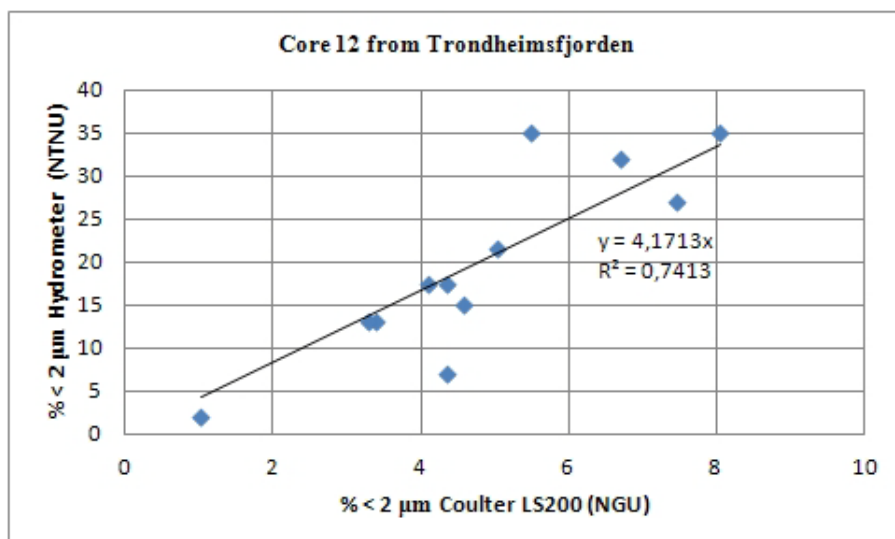
LS200 (Fig. 7). De tre mest finkornige prøvene ga et leirinnhold på 16,5-25,5%, mens Coulter LS200 kun målte 2,5-4,5%. Åtte referanseprøver fra ca. 7-8 m dyp i kjernen ga et leirinnhold på 17-30% (Falling drop), men disse ble ikke målt med Coulter LS200.



Figur 7. Mengde leir målt med Coulter LS200 (optisk modell 'Leire') ved NGU og med Falling drop ved NGI på materiale nær glideplanet for et skred i kjernen GS10-163-01 fra Finneidfjord. Prøvene C-3b og E-4b representerer et tynt 'sandig, siltig, leirig' lag i den relativt homogene siltige leiren. Som ventet var det dårlig samsvar mellom metodene.

### 3.2.3 Analyser med Hydrometer (NTNU) og Coulter LS200 (NGU)

Kjernene 06010-12-1 og -12-2 fra Trondheimsfjorden ble undersøkt med Hydrometer ved Institutt for Bergteknikk, NTNU (Vingerhagen, 2007) og med laser på NGU (12 prøver) (Hansen et al., 2011). Bortsett fra 2 prøver, plotter prøvene ganske nær en trendlinje som indikerer at leirinnholdet målt med Hydrometer er omkring 4 ganger høyere enn Coulter LS200 (Fig. 8). De to prøvene som faller lengst fra trendlinjen er tatt ut i litt forskjellig dyp (2-3 cm), og noe av avviket kan kanskje forklares med at sedimentene ikke representerer samme avsetningsmiljø (lokale variasjoner).



Figur 8. Mengde av leir i parallelle prøver fra kjerne 0601012 (Trondheimsfjorden). Leirinnholdet er målt på NGU med Coulter LS200 (optisk modell 'Leire') og med Hydrometer på NTNU (Hansen et al., 2010; Vingerhagen, 2007). Selv om det er stor spredning i diagrammet, indikerer trendlinjen at 'leirinnholdet' målt med Hydrometer er omkring fire ganger høyere enn med laser.

#### 4. SAMMENLIGNING AV METODER - STUDIER I ANDRE LAND

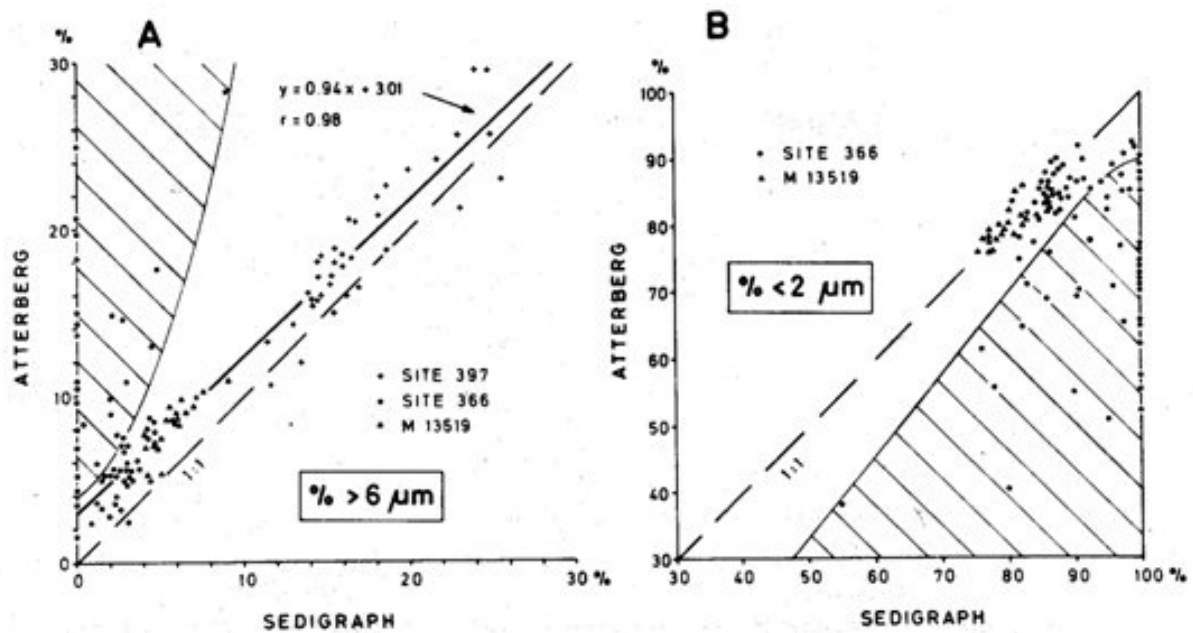
Det finnes en svært stor litteraturlbase på kornfordelingsanalyser, og her refererer vi først og fremst sammenlignende metodestudier. Det er flere artikler som omtaler sammenligning mellom Sedigraph og/eller laser med manuelle metoder, men vi har dessverre ikke kommet over sammenlignende studier av Sedigraph og laser.

##### 4.1 Sedigraph versus Pipette

Forskjellige studier viser noe varierende resultater, men generelt må det kunne konkluderes at det er en rimelig god overensstemmelse mellom disse metodene.

For dyphavsprøver fant Stein (1985) at analyse av totalt innhold av materiale <2 μm ga god overensstemmelse mellom metodene (Fig. 9b). For totalt innhold av materiale >6 μm ga pipette et gjennomsnittlig systematisk avvik i forhold til Sedigraph på omkring 3% (Fig. 9a). For prøver med et høyt innhold av montmorillonitt fant Stein (1985) et betydelig avvik, noe som forklares med denne leirmineralgruppens thixotrofi (tilbøyelighet til geldannelse). Stein (1985) presenterer imidlertid ingen sammenlignende kornfordelingskurver slik at vi kan se eventuelle avvik på kurveforløpet ved de ulike fraksjoner.

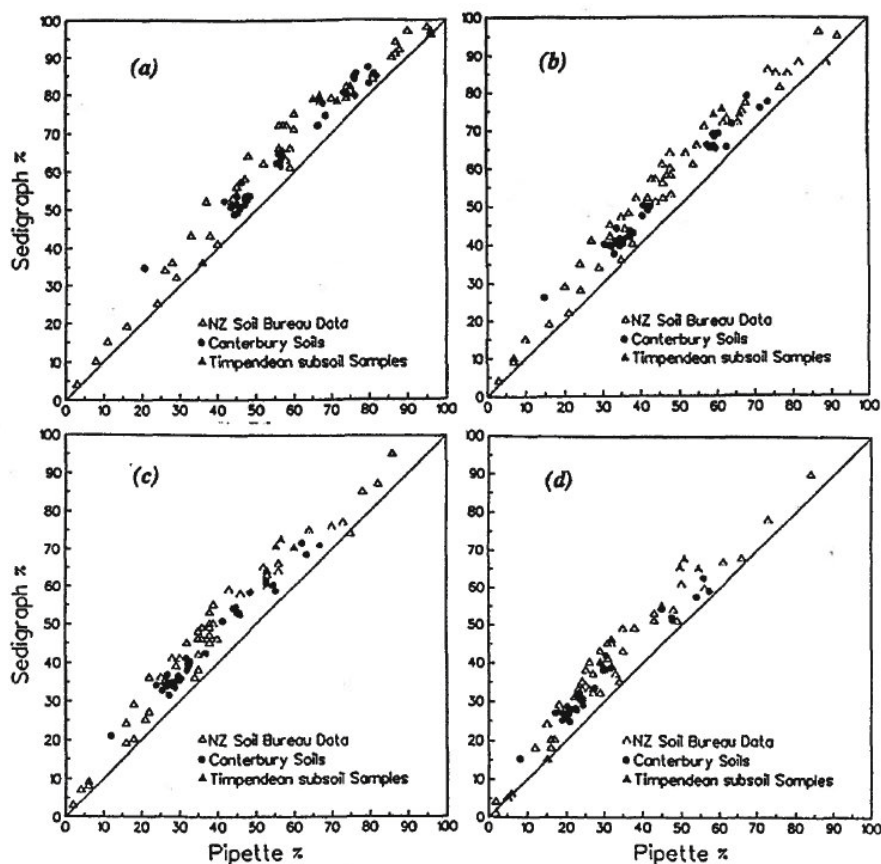




Figur 9. Sammenligning av kornfordelingsdata fra Sedigraph og Atterbergs pipetteanalyse for marine dyphavsprøver (etter Stein, 1985). De skraverte områdene markerer prøver med >50% montmorillonitt.

Coates & Hulse (1985) fant ved ulike materialtyper en meget god korrelasjon mellom pipette- og Sedigraph-analyser for kornstørrelser <16  $\mu\text{m}$ . For kornstørrelser >16  $\mu\text{m}$  ga Sedigraph markert grovere resultater. Singer et al. (1988) fant at analyser med Sedigraph var både nøyaktige og tilfredsstillende reproduserbare dersom konsentrasjonen på den analyserte suspensjonen holdes lavere enn 2%. Stein (1985) fant at konsentrasjonen burde være i størrelsesorden 2-3%. I begge de sistnevnte undersøkelsene fant en at finstoffinnholdet blir overrepresentert med Sedigraph ved høyere konsentrasjoner.

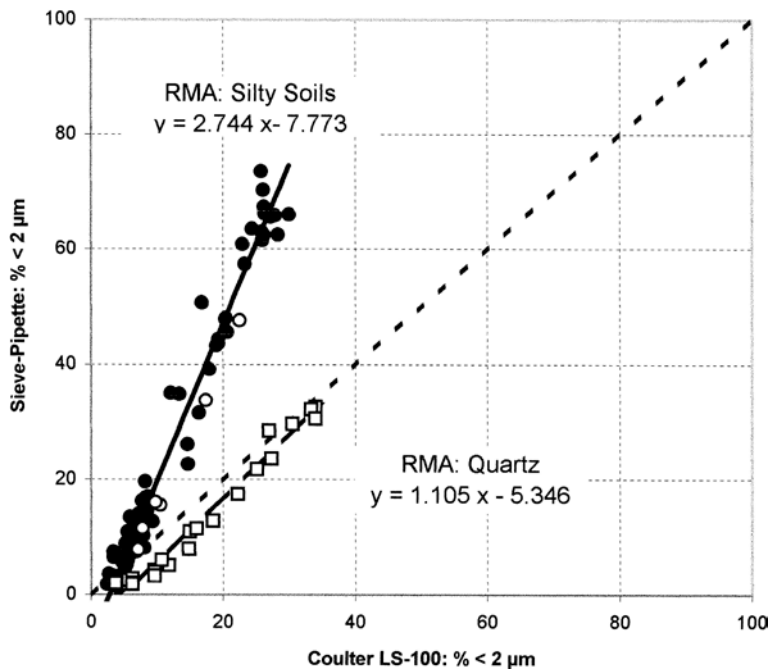
På to datasett av sedimenter fra New Zealand peker Buchan et al. (1993) på at Sedigraph gir systematisk høyere prosent-verdier enn Pipette ved korndiametre på 20, 10, 5 and 2  $\mu\text{m}$  (Fig. 10). Forfatterne mener at de forhøyede verdiene i første rekke skyldes konsentrasjon av jern i fin-fraksjonene (særlig i leire). Jern er en sterk absorbent av røntgenstråler og vil derfor påvirke tolkningen av partikkeltetthet.



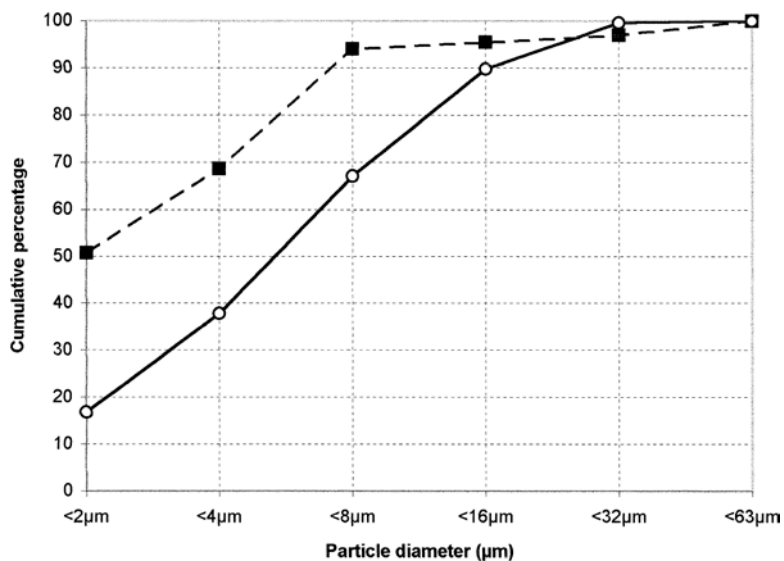
Figur 10. Sammenligning av kornfordelingsanalyser utført med Sedigraph og Pipette på prøver fra New Zealand (etter Buchan et al., 1993). Prosentverdier for forskjellige kornstørrelser (a;  $< 20 \mu\text{m}$ , b;  $< 10 \mu\text{m}$ , c;  $< 5 \mu\text{m}$ , d;  $< 2 \mu\text{m}$ ). Den viktigste årsak til at Sedigraph viser høyere verdier enn Pipette, er ifølge denne studien en anrikning av jern i finfraksjonene.

## 4.2 Coulter Laser versus Pipette

Disse to analysemetodene baserer seg på to ulike fysiske egenskaper til sedimentene, og en kan derfor ikke forvente annet enn at resultatene blir forskjellige. Mange undersøkelser viser derfor store avvik, spesielt for prøver med høyt innhold av leirmineraler. En undersøkelse av Beuselinck et al. (1998) viser at fraksjonen  $< 2 \mu\text{m}$  i naturlige sedimenter blir langt lavere ved laserdiffraksjon enn ved pipetteanalyse, mens det blir relativt god overensstemmelse med prøver bestående av møllemalt kvarts (Fig. 11). Resultatene fra Coulter Laser er vanskelige å sammenligne med de tradisjonelle metodene da det fineste materialet blir sterkt underrepresentert (Fig. 12). Det må bemerkes at Beuselinck et al. (1998) benyttet Fraunhofers diffraksjonsteori, da denne teorien i følge Loizeau et al. (1994) måler betydelig høyere andel leir enn Mies teori (benevnt optisk modell 'Leire' ved NGU).



Figur 11. Sammenligning av analyseresultater med Pipette og Coulter Laser for finkornige materialer med ulike mineralinnhold (Fraunhofers diffraksjonsteori benyttet). Åpen firkant: Mølle malt kvarts; Åpen sirkel: Jordart med organisk materiale fjernet; Lukket sirkel: Jordart med organisk materiale. Etter Beuselinck et al. (1998).

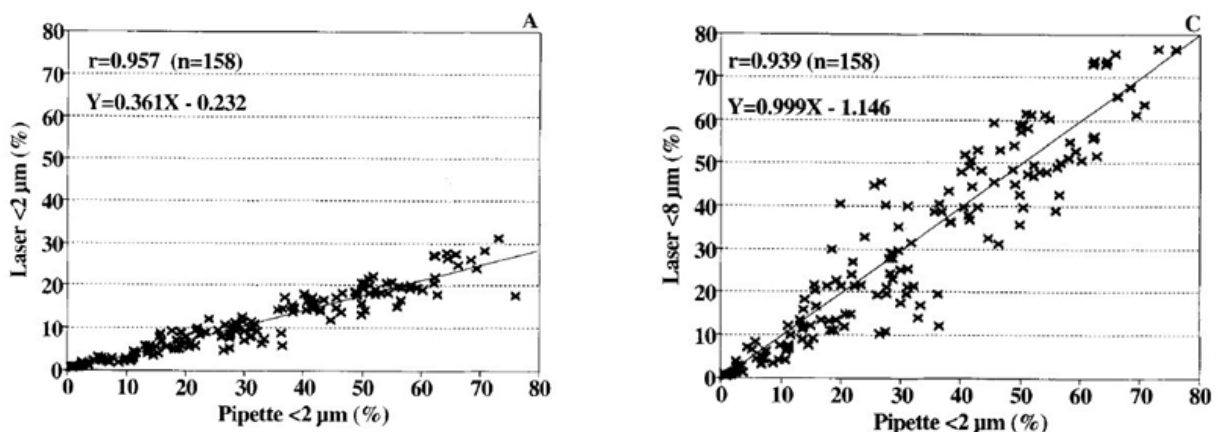


Figur 12. Kumulativ kornfordeling av en leirrik sedimentprøve. Åpen sirkel: Coulter Laser 100 (Fraunhofers diffraksjonsteori benyttet); Lukket firkant: Pipette-analyse. Etter Beuselinck et al. (1998).

Konert & Vandenberghe (1997) har utført sammenlignende analyser av anbefalte standarder (BCR materiale). Av fire finkornige standarder var det dårlig overensstemmelse mellom Pipette og Coulter Laser for to av dem og god overensstemmelse for de to andre. Der det var

god overensstemmelse var partiklene i leirfraksjonen kubiske og ikke plateformet. Finkornige prøver med leirmineraler falt dårlig ut i denne sammenligningen. Undersøkelser i elektronmikroskop (SEM) viste at leirpartikler med 'Stokes diameter' på 2 µm kunne ha en diameter på 10 µm og en tykkelse på 0.4 µm. For å unngå forvirring, som skyldes kornformen i relasjon til analysemetoden, anbefaler forfatterne at grensen for leirfraksjon ikke settes ved 2 µm når instrumenter som baserer seg på laserdiffraksjon blir benyttet som metode.

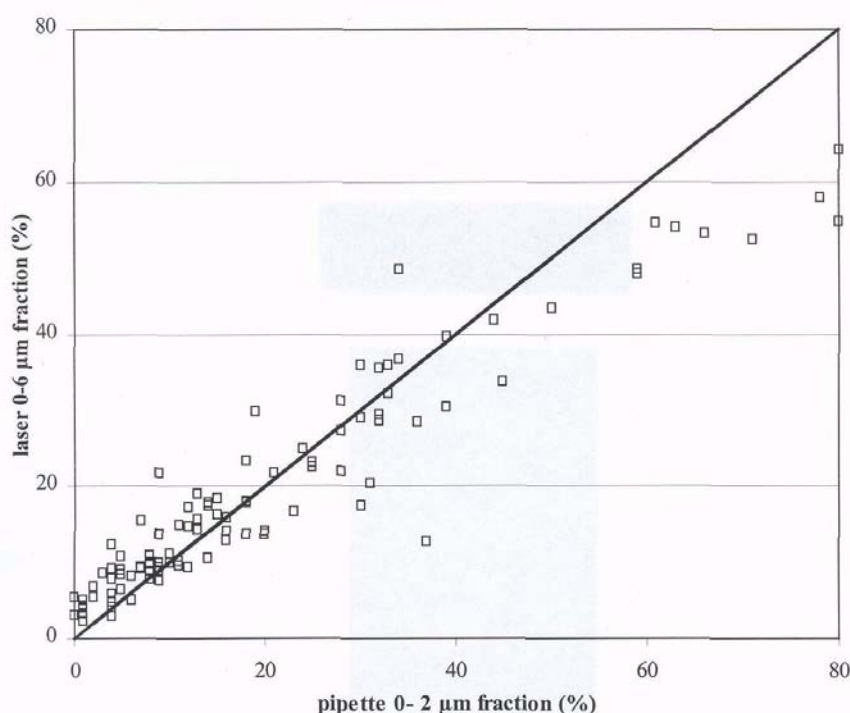
Konert & Vandenberghe (1997) undersøkte også et stort datasett (158 prøver) av fluviale, eoliske og lakustrine sedimenter fra Nederland med både pipetteanalyse og laser (FRITSCH 'Laser Particle Sizer'; Fraunhofers optiske modell). Plotting i xy-diagram viser at Pipette ga omkring 3 ganger høyere leirinnhold enn lasermålinger (Fig. 13a). Den beste korrelasjonen mellom metodene ble oppnådd ved å plote 8 µm fra lasermålinger mot 2 µm fra pipette (Fig. 13c). Den store spredningen på hver side av 1:1 linjen i diagrammet skyldes sannsynligvis en stor spredning i partikkelform i sedimenter av ulik genese. Konert & Vandenberghe (1997) anbefaler å benytte omkring 8 µm som ekvivalent grense for leir i stedet for 2 µm hvis lasermålinger benyttes, og begrunner dette med at forskere innenfor geofag og miljørelaterte fag får en mere felles beskrivelse/klassifisering og forståelse av sedimentene uavhengig om det benyttes Pipette eller Laser.



Figur 13. Laseranalyser (FRITSCH 'Laser Particle Sizer', Fraunhofers optiske modell) versus pipettemålinger på parallelle prøver av forskjellige sedimenter fra Nederland (etter Konert & Vandenberghe, 1997). A) Pipettemålinger ga omkring 3 ganger høyere leirinnhold enn lasermålinger. C) Plott som viser at prosent materiale <math>< 8 \mu\text{m}</math> (laser) korrelerer best med leirinnholdet målt med pipette. Den store spredningen i diagrammet antas å være forårsaket av store forskjeller i partikkelform på sedimenter av ulik genese.

Over 100 prøver belgiske jordarter ble undersøkt for å finne en praktisk metode for sammenligning av fraksjonene leir, silt og sand bestemt med henholdsvis sikting-pipette og sikting-Coulter LS200 (Vandecasteele & de Vos, 2001). Bakgrunnen for undersøkelsen var at laser-analyser ga alt for lavt innhold av leir sammenlignet med tradisjonelle metoder, og at mange brukere var tilbakeholdne til å benytte ny teknologi selv om laser hadde mange

fordeler. Det ble sett på som spesielt uheldig at laser skapte forvirring ved anvendelse av etablert jordarts-terminologi definert som 7 jordartsklasser i et belgisk trekantdiagram (Leir ( $< 2 \mu\text{m}$ ) – silt ( $2\text{-}50 \mu\text{m}$ ) – sand ( $50\text{-}2000 \mu\text{m}$ ). Den beste korrelasjonen for leirfraksjonen ble oppnådd ved å plote  $<2 \mu\text{m}$  bestemt med pipette mot  $<6 \mu\text{m}$  målt med Coulter LS200 – Fraunhofers optisk modell (Fig. 14). Ved å benytte  $6 \mu\text{m}$  som grense for leirfraksjonen og noe korreksjon for sandfraksjonen (laser-analyse), ble det oppnådd et langt bedre samsvar i jordartsterminologi uavhengig av metode. Forfatterne påpeker imidlertid at for prøver med leirinnhold  $>40\%$  er det en underestimering av leirfraksjonen ved å benytte mengde  $<6 \mu\text{m}$  fra Coulter LS200 som ekvivalent verdi (se Fig. 14).



Figur14. Diagram som viser leirinnholdet målt med pipette versus prosent  $<6 \mu\text{m}$  målt med laser (Fraunhofers optiske modell) (etter Vandecasteele & de Vos, 2001). Hvis  $6 \mu\text{m}$  fra laser benyttes som ekvivalent størrelse for leir blir leirinnholdet ofte for høyt sammenlignet med pipette (lavt leirinnhold plotter over 1:1-linjen). For leirinnhold  $>40\%$  (pipette), vil bruk av  $6 \mu\text{m}$  fra laser som ekvivalent grense for leir derimot underestimere leirinnholdet sammenlignet med pipette.

En annen studie foreslår å bruke en tilsvarende ekvivalent kornstørrelse for leir ved lasermålinger. Leirinnholdet i 118 prøver fra nordlige Andaman Sea ble bestemt med sikting-laser (Malvern Mastersizer 2000) til 37% (gjennomsnitt alle prøver) av hva som ble målt med sikting-pipette (Ramaswamy & Rao, 2006). I denne studien ble partikler definert finere enn  $2 \mu\text{m}$  fra Stokes lov separert ved sedimentasjon. Denne fraksjonen ble undersøkt med laser, som viste at størsteparten av partiklene hadde en øvre "størrelse" på mellom  $4.8$  og  $7.7 \mu\text{m}$ . Ramaswamy & Rao (2006) fastslår at en leirpartikkel  $2 \mu\text{m}$  stor målt med pipette

korresponderer best med en 6.2  $\mu\text{m}$  stor partikkel målt med laser. Inntil en ny sedimentteksturklassifisering basert på laser er etablert, mener forfatterne at en skal konvertere resultatene basert på kalibreringsfaktorer. Forfatterne mener at utregning av et ekvivalent leirinnhold vil gjøre det mulig å sammenligne lasermålinger med eksisterende databaser og litteratur som i hovedsak er basert på metoder som anvender sedimentasjonsprinsippet.

### 4.3 Coulter laser versus Hydrometer

228 sedimentprøver fra et sedimentasjonsbasseng nær Sicilia (Stefano et al., 2010) ble undersøkt med sikting-laser (Fritch Particle Sizer Analysette 22) og sikting-Hydrometer. Fraunhofers diffraksjonsmodell ble benyttet, men i motsetning til studiene referert tidligere fant Stefano et al. (2010) bare små avvik mellom Fraunhofers og Mies teorier. Trendlinjen viste at prosent leir bestemt med Hydrometer er nær 2 ganger høyere enn korresponderende lasermålinger.

## 5. DISKUSJON

### 5.1 Klassifikasjonssystemer og leirinnhold

De fleste forskere som jobber med naturlige sedimenter bruker i dag 0,002 mm (2  $\mu\text{m}$ ) som grense mellom kornstørrelsene leir og silt. Udden-Wentworths klassifikasjonsskjema (Wentworth, 1922) som angir leir som  $<4 \mu\text{m}$  er i dag lite anvendt, særlig i Europa. Mengdeforholdene mellom leir, silt og sand, eventuelt mellom leir/silt (mudder eller slam), sand og grus, plottes i trekantdiagram og benyttes for å gi jordartene beskrivende navn. Det finnes svært mange klassifikasjonssystemer og et tilsvarende stort spenn i jordartsterminologi (Blott & Pye, 2012).

Også i Norge benyttes forskjellige klassifikasjonssystemer. Geoteknikere legger stor vekt på leirinnholdet i sine beskrivelser av marine sedimenter, da det er dette som har størst betydning for finkornige sedimenters egenskaper (Janbu, 1970):

> 30% leir: Leire

15-30% leir: Leire, men med adjektiv (f. eks. siltig, sandig leire)

5-15% leir: leirig, f.eks. leirig silt

For sedimenter med under 2% grus benytter NGU et klassifikasjonssystem som tar utgangspunkt i mengdefordelingen av fraksjonene leir, silt og sand (Folk, 1954). For at et sediment skal få betegnelsen Leire må det være under 10% sand og mengdeforholdet leir:silt  $>2:1$ . Etter denne definisjonen må det altså være minst 60% leir i jordarten for at den skal få betegnelsen Leire. Er grusinnholdet over 2% benyttes et annet trekantdiagram (noe modifisert

etter Folk, 1954), som klassifiserer jordartene etter mengdeforholdet mellom leir/silt (<63 µm), sand og grus. Benyttes dette diagrammet får ikke leirinnholdet (selv om det er høyt) noen innvirkning på jordartsnavnet.

Det er sjelden at leirinnholdet i norske marine eller glasimarine leirer er over 60%, selv om analysene er utført med de tradisjonelle manuelle metodene (Hydrometer, Pipette, Falling drop) eller Sedigraph som gir de høyeste verdiene. De fleste i Norge er kjent med jordarten Leire som ('blåleire', 'gråleire', 'marin leire', 'glasimarin leire', 'feit leire', 'mager leire', 'kvikkleire' osv.). Det kohesive og plastiske materialet Leire har spesielle egenskaper som alle har et forhold til (også renholdsarbeidere – spesielt vanskelig å fjerne når den tørker). Diskusjon om hvilket klassifikasjonsskjema som er best egnet som grunnlag for terminologi vil imidlertid falle utenfor målsetningen med denne rapporten.

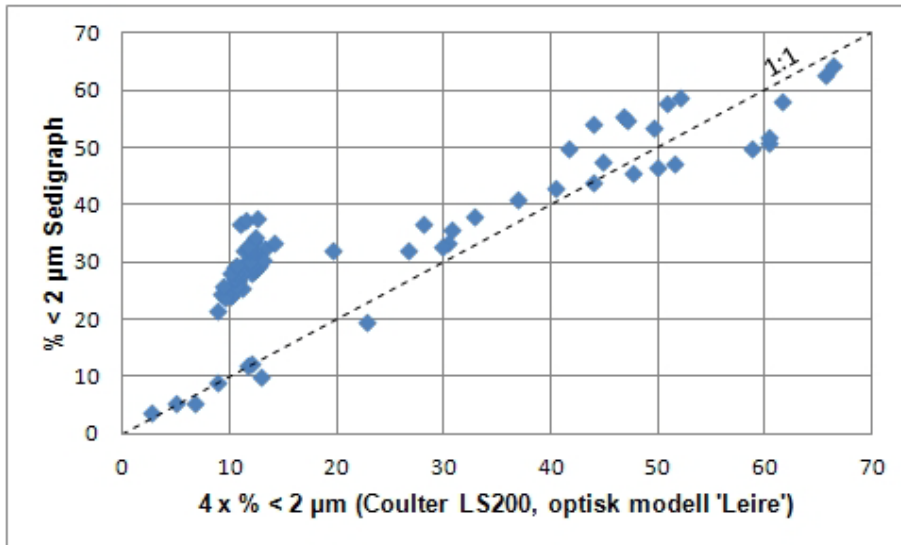
Metodestudien som er utført og tilsvarende undersøkelser av utenlandske sedimenter, viser entydig at lasermålinger gir et langt lavere leirinnhold enn andre kornfordelingsmetoder. De laveste verdiene oppnås ved å anvende Mies teori for å transformere diffraksjonsmønsteret til kornstørrelser (d.v.s. optisk modell 'Leire' som benyttes ved NGU). Det er sjelden at leirinnholdet i sedimenter som av folk flest blir oppfattet som 'feit leire' blir målt over 15% (se Fig. 4), og det er innlysende at kornfordelingsanalyser med laserinstrumenter ofte fører til en helt feil oppfatning av sedimentene og at de klassifiseres på feilaktig grunnlag. Et kvikkleireskred går ikke i et materiale som klassifiseres som silt.

## **5.2 Forslag til korreksjon av leirinnholdet målt med Coulter LS200 - modell 'Leire'**

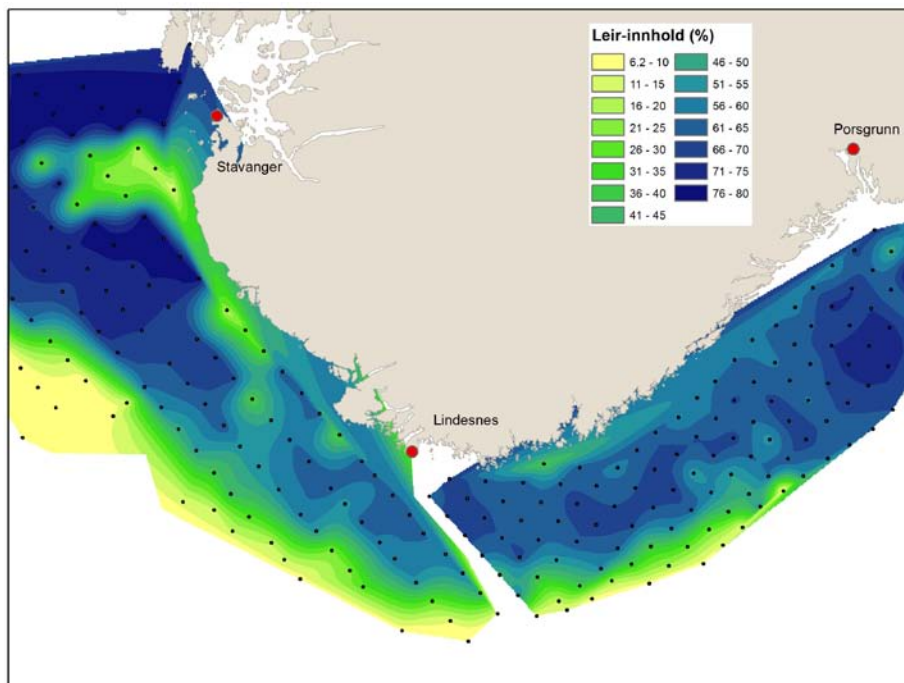
De forskjellige metodene baseres på ulike fysiske forutsetninger og fysiske lover. Både sedimentasjonsmetoder (Hydrometer, Pipette, Falling drop, Sedigraph) og Coulter laser tar utgangspunkt i at partiklene har kuleform, noe som langt fra er tilfelle i finkornige sedimenter med mye leirminerale. Partikler <2 µm lar seg ikke objektivt måle med noen av metodene. Det synes helt klart at metoder basert på sedimentasjonsprinsippet gir for høye prosentverdier av leir, og at lasermålinger gir for lave verdier. Siden det aller meste av jordartsforståelse og klassifikasjon er basert på de tradisjonelle metodene bør leirinnholdet målt med laser korrigeres slik at det blir mest mulig samsvar med resultater fra tradisjonelle metoder, der en har 100 års internasjonal erfaring. Selv om de undersøkte datasettene består av relativt få prøver, synes det mulig å komme fram til en tommelfingerregel for korreksjon. Det kompliserer imidlertid bildet noe at prøvene fra Finneidfjord faller utenfor den generelle trendlinjen for Coulter LS200 versus Sedigraph (Fig. 4).

Det blir et relativt godt samsvar i leirinnhold mellom laser og Sedigraph hvis leirinnholdet fra laser firedobles og prøvene fra Finneidfjord holdes utenfor (Fig. 15). En firedobling av leirinnholdet målt med laser vest for Lindesnes gir et kart over leirinnholdet som stemmer bra overens med Sedigraph-verdier øst for Lindesnes (Fig. 16). Det kan faktisk se ut som en korreksjonsfaktor på litt over fire ville gitt enda bedre samsvar. Sammenlignes det korrigerte

kartet med det opprinnelige kartet basert på rapporterte verdier (Fig. 1), er det innlysende at lasermålinger av leirinnholdet må korrigeres.



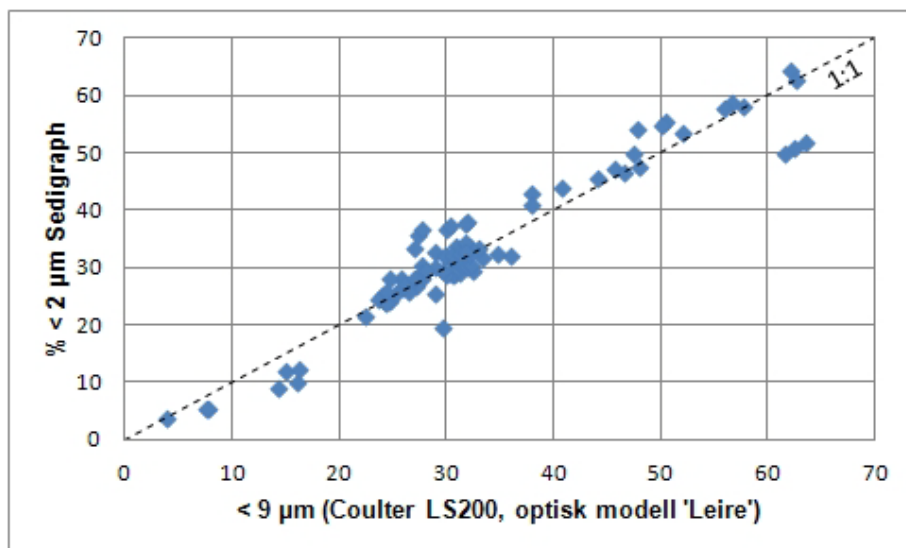
Figur 15. Plott av dataserier for sammenligning mellom Coulter LS200 (NGU) og Sedigraph (NGU og UiB) (se Tabell 1). Det firedobbelte leirinnholdet målt med laser korresponderer godt med leirinnholdet fra Sedigraph. Prøvene fra Finneidfjord plotter også her høyt over 1:1 linjen.



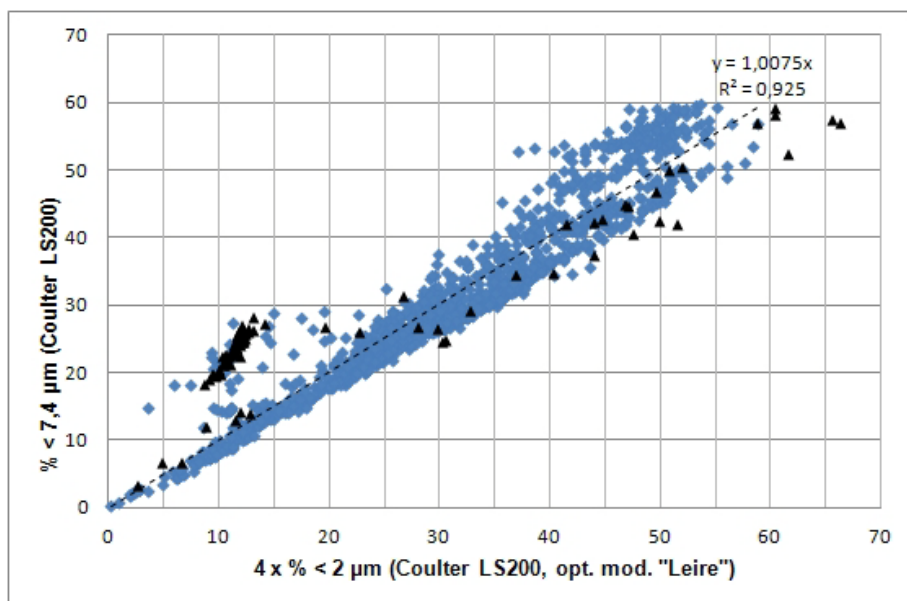
Figur 16. Korrigert kart som viser innhold av leir (%) i bunnsedimentene (2-5 cm dyp) i sørlige Norskerenna. Øst for Lindesnes er analysene utført med Sedigraph (Bøe, 1995). Prosent  $< 2 \mu\text{m}$  i prøvene vest for Lindesnes (målt med laser; Bøe et al., 1997) er firedoblet for å få et ekvivalent leirinnhold som gir brukbar overensstemmelse mellom analysemetodene (se ukorrigert kart; Fig. 1).



Prosent materiale finere enn 9  $\mu\text{m}$  fra lasermålinger korrelerer svært bra med leirinnholdet fra Sedigraph (Fig. 17), og prøvene fra Finneidfjord plotter omkring trendlinjen. Da datasettene for sammenligning består av relativt få prøver fra et begrenset antall lokaliteter, testet vi de antatt beste korreksjonsfaktorene på et stort og mere representativt datasett (MAREANO-prøver 2003-2009). Datasettet består av ca. 1200 prøver fra ca. 100 stasjoner på sokkelen og kontinentalskråningen utenfor Nord-Norge. Korrelasjonsplott av den firedoble prosentverdien av leir ( $<2 \mu\text{m}$ ) versus  $\%<9 \mu\text{m}$  viser at trendlinjen i dette datasettet ligger ca. 10% over prøvene i datasettene for sammenligning (som plottet nær 1:1-linjen; Finneidfjorddata ikke inkludert). På bakgrunn av dette, samt at Sedigraph ofte gir noe høyere leirinnhold enn andre metoder basert på sedimentasjonsprinsippet (Norges Geoteknisk Institutt, 1986; Buchan et al., 1993), valgte vi 7,4  $\mu\text{m}$  som en mulig bedre kandidat for beregning av ekvivalent leirinnhold. Et korrelasjonsplott (Fig. 18) viser at firedobling av leirinnholdet målt med laser samsvarer meget godt med mengde partikler finere enn 7,4  $\mu\text{m}$  (MAREANO-prøver analysert med Coulter LS200, optisk modell 'Leire'). Prøvene med høyest leirinnhold inkludert i denne rapporten (Tabell 1) plotter litt under trendlinjen for MAREANO-prøvene. Noen titalls MAREANO-prøver med meget lavt leirinnhold plotter i samme område som prøvene fra Finneidfjord, altså høyt over trendlinjen. Da MAREANO-prøvene ikke er analysert med andre metoder, vet vi ikke om avviket skyldes mye leir (som i Finneidfjord) eller fin silt.



Figur 17. Prosent korn  $<9 \mu\text{m}$  (laser) korresponderer godt med leirinnholdet målt med Sedigraph. Legg merke til at prøvene fra Finneidfjord ligger på/nær 1:1 linja.



Figur18. Firedobling av leirinnholdet målt med Coulter LS200 på 1200 prøver fra MAREANO (blå diamant) samsvarer godt med % <7,4 μm målt med samme instrument. Legg merke til at de mest leirrike 'sammenligningsprøvene' (lukket trekant) plotter under trendlinjen for MAREANO-prøvene. Noen prøver med lavt leirinnhold plotter i nærheten av Finneidfjord-prøvene, d.v.s. høyt over trendlinjen.

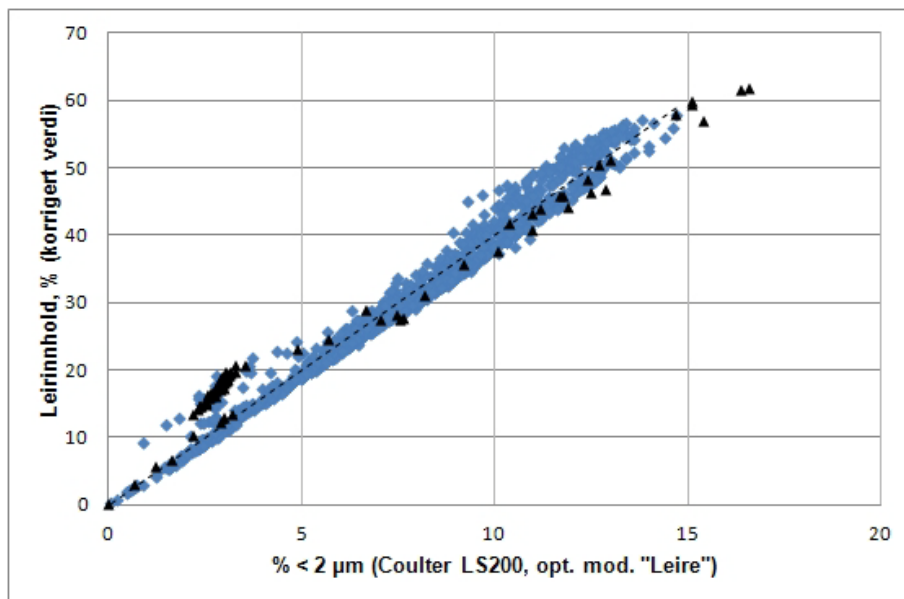
Partiklenes størrelsesfordeling, kornform og mineralogi varierer i naturlige sedimenter, og det finnes ingen fasit på hvilken korreksjonsfaktor det er best å bruke, d.v.s. som gir minst gjennomsnittlig avvik fra leirinnholdet målt med sedimentasjonsmetoder. Den beste korreksjonsfaktoren kan variere fra jordart til jordart og fra område til område. Det ekvivalente leirinnholdet kan være % <9 μm, % <7,4 μm eller omkring det firedoble av % <2 μm. For å minske usikkerheten for at leirinnholdet i enkelte prøver blir altfor høyt eller i andre prøver for lavt foreslår vi følgende oppskrift for beregning av et ekvivalent leirinnhold basert på Coulter LS200 (optisk modell 'Leire'):

Ekvivalent leirinnhold ~ Halve summen av den firedoble prosentverdien av materiale <2 μm pluss prosent materiale <7,4 μm, eller:

$$\text{Leirinnhold} \sim (4 \times \% < 2 \mu\text{m} + \% < 7,4 \mu\text{m})/2$$

Denne korrigerte verdien for leirinnholdet målt med Coulter LS200 viser liten spredning av verdier omkring trendlinjen for MAREANO-prøvene (Fig. 19), og vi tror at en slik korreksjon (for minst 90% av norske marine og glasimarine sedimenter) vil gi et ekvivalent leirinnhold som samsvarer godt med leirinnholdet fra metoder basert på sedimentasjonsprinsippet. Den store prøveserien fra MAREANO (ca. 1200 prøver) tyder på at det er få prøver, i alle fall på kontinentalsokkelen, som oppfører seg så anormalt som prøvene fra Finneidfjord. Det finnes sikkert enkelte lokaliteter som i likhet med Finneidfjord gir ekstremt lave leirverdier med

laser, men uansett vil den foreslåtte korreksjonsfaktoren gi et leirinnhold som er mere i tråd med vår tradisjonelle oppfatning av leirinnholdet kohesive sedimenter.



Figur 19. Prosent materiale  $< 2 \mu\text{m}$  plottet mot et foreslått ekvivalent leirinnhold utregnet som gjennomsnittet av den firedoble leirprosenten pluss  $< 7,4 \mu\text{m}$  (alle verdier fra Coulter LS200). For minst 90% av norske jordarter antas det ekvivalente (korrigerte) leirinnholdet å samsvare godt med leirinnholdet bestemt av metoder basert på sedimentasjonsprinsippet. Blå diamant: MAREANO-prøver med stiptet trendlinje; svart trekant: sammenligningsprøver analysert både med laser og Sedigraph.

## 6. ANBEFALINGER FOR VIDERE KORNFORDDELINGSTUDIER VED NGU

Ved NGU foreligger en stor mengde kornfordelingsanalyser utført med Coulter LS200. Mies teori (optisk modell 'Leire') har i utstrakt grad blitt benyttet ved analyser av finkornige sedimenter. Selv om Fraunhofers diffraksjonsteori gir høyere prosentverdier av fraksjonen leir, anbefales NGU Lab å forsette med samme praksis som tidligere. Kun på denne måten kan en enhetlig database basert på samme instrument/metode bygges opp.

I kartleggingsprosjekter hvor det inngår en stor mengde kornfordelingsanalyser, foreslås det at en går gjennom tidligere NGU Lab-rapporter og regner ut et ekvivalent/korrigert leirinnhold som samsvarer bedre med metoder basert på sedimentasjonsprinsippet. Verdier som allerede er lagt inn i NGUs databaser bør korrigeres.

Det anbefales også at eksisterende jordartsklassifisering foretatt etter kornfordelingsanalyser med Coulter LS200 korrigeres med utgangspunkt i et beregnet ekvivalent leirinnhold. I forbindelse med en eventuell reklassifisering av jordarter bør det foretas en ny evaluering av

hvilket klassifikasjonssystem som er best egnet for norske forhold. Det er mye av jordarten Leire i Norge, og det bør komme fram av kart og databaser.

Prøveseriene fra Norge for sammenligning av Coulter LS200 og Sedigraph (eller andre metoder basert på sedimentasjonsprinsippet) er relativt begrenset i antall/representativitet. Det foreslås derfor at sammenligningsdatabasen som er dokumentert i denne rapporten bygges ut litt om senn. En måte å gjøre dette på er at UiB tar ut parallelle prøver fra kjerner som analyseres med Sedigraph (større prøveserier), og sender disse til NGU for kjøring på Coulter LS200.

Årsakene til det svært lave leirinnholdet målt med laser i Finneidfjord (ca. 10% av Sedigraph-verdiene) er ikke forstått, og bør undersøkes nærmere.

## 7. KONKLUSJONER

Kornfordelingsanalyser med laserinstrumenter gir et altfor lavt innhold av leir i finkornige sedimenter sammenlignet med metoder basert på sedimentasjonsprinsippet (se Fig. 1). Mies diffraksjonsteori, som vanligvis benyttes på finkornige sedimenter ved NGU (benevnt optisk modell 'Leire'), gir lavere innhold av leir enn optisk modell Fraunhofer (Fig. 2). Dette er dokumentert både i denne studien og i flere sammenlignende undersøkelser på jordarter fra andre land. Fraunhofers teori er oftest benyttet i utenlandske studier av finkornige sedimenter.

Kornfordelingsanalyse på et utvalg av sedimenter fra forskjellige steder i Norge (hovedsakelig marine og glasimarine sedimenter) ble utført på parallelle prøver med Sedigraph (analyser ved UiB og NGU) og Coulter LS200 (optisk modell 'Leire'). Sammenligning av resultatene viser at leirinnholdet (<2 µm) målt med Sedigraph er omkring firedobbelt av leirinnholdet målet med laser (Fig. 4).

Prøver fra det undersjøiske skredområdet i Finneidfjord faller langt utenfor den generelle trenden, og viser et leirinnhold målt med laser på kun ca. 10% av leirinnholdet målt med Sedigraph.

For de undersøkte prøvene blir korrelasjonen nær 1:1 hvis en plotter %<2 µm (Sedigraph) mot %<9 µm (Coulter LS200). Også prøvene fra Finneidfjord plotter meget nær trendlinjen (Fig. 17).

Marine og glasimarine sedimenter fra kontinentalmarginen (ca. 1200 prøver fra ca. 100 lokaliteter) viser at %<7,4 µm samsvarer best med det firedobbelte leirinnholdet målt med laser.

Ved NGU foreligger en stor mengde kornfordelingsanalyser utført med Coulter LS200. Mies teori (optisk modell 'Leire') har i utstrakt grad blitt benyttet ved analyser av finkornige

sedimenter. Selv om Fraunhofers diffraksjonsteori gir høyere prosentverdier av fraksjonen leir, anbefales NGU Lab å forsette med samme praksis som tidligere. Kun på denne måten kan en enhetlig database basert på samme instrument/metode bygges opp.

Den beste korreksjonsfaktoren kan variere fra jordart til jordart og fra område til område. Basert på Coulter LS200 (optisk modell 'Leire') foreslår vi følgende formel for beregning av ekvivalent leirinnhold:

$$\text{Leirinnhold} \sim (4 \times \%<2 \mu\text{m} + \%<7,4 \mu\text{m})/2$$

Denne formelen vil gi verdier som samsvarer bra med leirinnholdet målt med metoder basert på sedimentasjonsprinsippet, og minske muligheten for at leirinnholdet i enkelte prøver blir altfor høyt eller altfor lavt.

## 8. REFERANSER

- Bargel, T.H., 2001. Kornfordeling av finkornige sedimenter. Litteraturoppgave i forbindelse med dr.ing. studium ved Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU. 11 pp.
- Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G., & Froyen, L., 1998. Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, 32, 193-208.
- Blott, S.J. & Pye, K., 2012. Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology*, 59, 2071–2096.
- Buchan, G.D., Grewal, K.S., Claydon, J.J. & McPherson, R.J., 1993. A comparison of sedigraph and pipette methods for soil particle-size analysis. *Aust. J. Soil Res.*, 31, 407–417.
- Bøe, R., Rise, L. & Olsen, H.A., 1997. Sedimentologi og geotekniske undersøkelser på sedimentkjerner fra Norskerenna mellom Kristiansand og Karmøy (tokt 9506 og 9606). NGU rapport 97.088, 178 s.
- Bøe, R., 1995. Sedimentologi og geotekniske undersøkelser på sedimentkjerner tatt under tokt 9404 i Skagerrak, med oppsummering av resultater 1992-1995. NGU rapport 95.020, 102 s., 1 kart.
- Coates, G.F. & Hulse, C.A., 1985. A comparison of four methods of size analysis of fine-grained sediments. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 28, 369-380.
- de Boer, G. B., de Weerd, C., Thoenes, D., & Goossens, H. W., 1987. Laser diffraction spectrometry: Fraunhofer versus Mie scattering. *Particle Characteristics*, 4, 14-19.
- Folk, R.L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology*, 62, 344–359.
- Goossens, D., 2008. Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediments: a comparative study of ten instruments for wet analysis. *Sedimentology*, 55, 65-96.
- Hansen, L, L'Heureux, J-S & Longva, O., 2011. Turbiditic, clay-rich event beds in fjord-marine deposits caused by landslides in emerging clay deposits - palaeoenvironmental interpretation and role for submarine mass-wasting. *Sedimentology* 58, 890-915.
- Janbu, N., 1970. Grunnlag i geoteknikk. Lærebok Norges Tekniske Høyskole, 426 pp. Tapir forlag, Trondheim.

Konert, M., & Vandenberghe, J., 1997. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44, 523-525.

Loizeau, J. L., Arbouille, D., Santiago, S., & Vernet, J. P., 1994. Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyzer for use with sediments. *Sedimentology*, 41, 353-361.

Longva, O. & Thorsnes, T. (editors), 1997. Skagerrak in the past and at the present. An integrated study of geology, chemistry, hydrography and microfossil ecology. Norges geologisk undersøkelse, Special Publication 8, 98 pp.

Loveland, P.G. & Whalley, W.R., 1991. Particle size analysis. In: Soil analysis – Physical methods. Smith, K.A. & Mullins, C.E. (red.). Marcel Dekker, New York. pp. 271-328.

Norges Geotekniske Institutt, 1986. Kornfordelingsanalyser ved NGI. En vurdering av Sedigraph 5000 ET. Intern rapport NGI. 6 pp, 8 vedlegg.

Ramaswamy, V. & Rao, P.S., 2006. Grain size analysis of sediments from the northern Anaman Sea: comparison of laser diffraction and sieve-pipette techniques. *Journal of Coastal Research*, 22 (4), 1000-1009.

Rise, L., Chand, S., Hafliðason, H., L'Heureux, J. -S., Hjelstuen, B. O., Bellec, V., Longva, O., Brendryen, J., Vanneste, M. & Bøe, R., 2011. Investigations of Slides at the Upper Continental Slope Off Vesterålen, North Norway. In: Yamada Y. et al (Eds), *Submarine Mass Movements and Their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research Series*, Springer, Vol. 34, 167-176.

Singer, J.K., Anderson, J.B., Ledbetter, M.T., McCave, I.N., Jones, K.P.N. & Wright, R., 1988. An assessment of analytical techniques for the size analysis of fine-grained sediments. *Journal of Sedimentary Petrology* 58, pp. 534-543.

Stefano, C. Di, Ferro, V. & Mirabile S., 2010. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. *Biosystems Engineering*, 106, 205-215.

Stein, R., 1985. Rapid grain-size analyses of clay and silt fraction by Sedigraph 5000D: Comparison with coulter Counter and Atterbergs methods. *Journal of Sedimentary Petrology*, 55, 590-615.

Vandecasteele, B. & de Vos, B., 2001. Relationship between soil textural fractions determined by the sieve-pipette method and laser diffractometry. Report IBW Bb R 2001.005, 19 pp. Instituut voor Bosbouw en Wildbeheer.

Vingerhagen, G., 2007. Nidelvdeltaets utvikling med hovedvekt på stratigrafi og skred. Masteroppgave i teknisk geologi, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, 59 pp.

Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377–392.



## VEDLEGG 1. PROSEDYREBESKRIVELSE COULTER LASER 200 (NGU)

Et utdrag av beskrivelser i Lab-dokument NGU–SD 5.11 (Kornfordelingsanalyse med Coulter Laser partikkelteller) er gitt nedenfor:

### Prøvepreparering

Dersom prøven inneholder materiale større enn 2 mm, må dette fjernes ved for eks. å tørrsikte prøven. Det bør brukes kvadratisk sikt av metallduk som er kontrollert mot en tilsvarende kalibrert sikt.

Dersom prøven inneholder en stor fraksjon materiale større enn 2 mm vil den normalt bli tørrsiktet ned til 0.5 mm, slik at kun fraksjonen <0.5 mm analyseres på Coulter Laser. Analysene skal i disse tilfeller rapporteres uakkreditert (ettersom tørrsikting ikke inngår i NGU-Labs akkrediterte virksomhet).

I beskrivelsen er det følgende merknader:

- *Representativt uttak.* Ved bruk av splitter for uttak av prøvemateriale kan denne bli statisk elektrisk og binde til seg finere partikler. Uttaksprosedyrer følges.

- *Valg av innvekt.* Det utføres først en foreløpig bestemmelse for å få undersøkt hvor stor innvekt som er passende for å utføre analysen. Dette kan rent praktisk gjøres ved å veie hele prøvematerialet og deretter overføre representativt materiale til en prøvebeholder, inntil konsentrasjonen viser 8-12 %. Alle veiinger foretas etter først å ha frysetørret materialet.

- *Organisk materiale.* Ved NGU Lab blir organisk materiale ikke fjernet hvis det ikke er visuell indikasjon på et høyt innhold, eller at oppdragsgiver spesifiserer dette i analysekontrakten.

- *Høy saltkonsentrasjon.* Dersom prøvemateriale har høyt innhold av salter bør prøvene avsaltes ved å slemme prøven opp i vann og la den stå i f.eks. 1 uke. Det klare vannet dekanteres eller suges av fra den sedimenterte prøven. Dette kan gjentas dersom det er nødvendig. Dette forutsetter selvfølgelig at det er vannløselige salter i prøven. En hurtigere metode er å sentrifugere etter oppslemming. Hastighet og tid for sentrifugen må tilpasses slik at de minste partiklene også sedimenterer før vannet dekanteres. I praksis er avsalting sjelden påkrevd og selv sjøbunnsedimenter kan analyseres uten forutgående avsaltning.

- *Desintegrering.* Prøver hvor middelkornstørrelsen er mindre enn 50 µm, eller prøver som inneholder betydelige mengder leire, bør alltid prepareres med ultralyd. Innveid prøve tilsettes 5-10 ml 5 % natriumpyrofosfatløsning og ca. 40 ml vann i et 50 ml begerglass. Dette røres

opp og behandles med ultralyd i 5 min. Prøvesuspensjonen helles så direkte i prøvebeholderen i maskinen. Spyl etter så hele prøven overføres.

### Preparering i maskinen

Det kan programmeres ultralydpreparering i maskinen f.eks.: "sonicate under loading and before analyse". Det er også mulig å ultralydpreparere under selve analysen dersom dette er ønskelig. Normalt bør prøver ultralydprepareres før de går i instrumentet, men dersom det er relativt mye grovt materiale kan preparering i instrumentet være OK. Problemet med bruk av «sonicate» i maskinen er fare for at det dannes luftbobler i vannet. Instrumentet vil oppfatte luftbobler som partikler med de analysefeil dette medfører.

- *Kjemikalier.* For å forhindre at partikler får ladning og fnokker seg, tilsettes prøvene en løsning av 5 % natriumpolyfosfat før preparering med ultralyd.

$\text{Na}_4\text{P}_4\text{O}_{10} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  Merck PA

- *Prøvestørrelse eller innvekt.* Minimum prøvemengde er avhengig av kornstørrelsen. I tabell 1 er det satt opp veiledende innvekter for prøveeksemplere med ulike medianverdier.

**Tabell 1. Veiledende innvekter for ulike medianverdier.**

MEDIAN DIAM. ( $\mu$ )	INNVEKT (g)
10	0.2
50	0.4
70	0.6
100	0.8
300-400	1.0
600	1.5 - 2.0

Disse verdiene er kun veiledende, utstyret gir en melding når tilstrekkelig mengde prøve er ladet i maskinen.

## **VEDLEGG 2. PROSEDYREBESKRIVELSE SEDIGRAPH III V1.04 (UIB)**

Prosedyren som er fulgt ved analysene på prøver fra GS10-163-05PC er følgende:

~7- ~11 ml sediments was sampled with a syringe from the recently splitted core.

The samples was weighted, dried at 50 degree Celsius for at least two days and weighted again.

The samples was then wet sieved over 1000, 150, 125 and 63  $\mu\text{m}$  meshes and the individual grain size fractions were dried and weighted. Sediments finer than 63 $\mu\text{m}$  was retained in buckets and dried.

Grain size distribution of sediments <63 $\mu\text{m}$  was measured by X-Ray monitored gravity sedimentation with a SediGraph III V1.04 (Micromeritics Instrument Corporation).

For Sedigraph analyses 3.0 g (1. analytical run) or 3.8 g (2. analytical run) dry weight sediments was added into ~75 ml of 0.05 % sodium polyphosphate solution (calgon) and shaken for at least 2 days.

The samples was then introduced into the sedigraph using a Micromeritics Mastertech 52 autosampler equipped with a stirrer and an ultrasonic probe. Each sample was stirred 30 seconds at high speed and ultrasonicated for 15 seconds immediately prior to transferal into the Sedigraph.

Each sample was measured 3 (1. analytical run) or 5 (2. analytical run) times and average values was calculated excluding some outliers. The calculation method is based on Stokes sedimentation and Beers law of extinction.



Norges geologiske undersøkelse  
Postboks 6315, Sluppen  
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse  
Leiv Eirikssons vei 39, 7040 Trondheim

Telefon 73 90 40 00  
Telefax 73 92 16 20  
E-post [ngu@ngu.no](mailto:ngu@ngu.no)  
Nettside [www.ngu.no](http://www.ngu.no)

*Geological Survey of Norway  
PO Box 6315, Sluppen  
7491 Trondheim, Norway*

*Visitor address  
Leiv Eirikssons vei 39, 7040 Trondheim*

*Tel (+ 47) 73 90 40 00  
Fax (+ 47) 73 92 16 20  
E-mail [ngu@ngu.no](mailto:ngu@ngu.no)  
Web [www.ngu.no/en-gb/](http://www.ngu.no/en-gb/)*