

# **GEOLOGI FOR SAMFUNNET**

SIDEN 1858



**NORGES  
GEOLOGISKE  
UNDERSØKELSE**  
· NGU ·

# NGU RAPPORT 2024.015

---

Kartlegging av organisk karbon i  
sjøbunnsedimenter i Stavanger kommune



NORGES  
GEOLOGISKE  
UNDERSØKELSE  
- NGU -

# NGU RAPPORT

Geologi for samfunnet – kunnskap for framtida

Norges geologiske undersøkelse  
Postboks 6315 Torgarden  
7491 Trondheim  
Tlf. 73 90 40 00

**Rapport nr:** 2024.015

**ISSN:** 0800-3416 (trykt)

**ISSN:** 2387-3515 (online)

**Gradering:** Åpen

**Tittel:** Kartlegging av organisk karbon i sjøbunnsedimenter i Stavanger kommune

**Forfatter:** Markus Diesing, Jochen Knies, Sigrid Elvenes, Reidulv Bøe

**Oppdragsgiver:** Stavanger kommune og NGU

**Fylke:** Rogaland

**Kommune:** Stavanger

**Kartblad: (M=1:250.000):**

**Kartbladnr. og -navn: (M=1:50.000):**

**Forekomstens navn og koordinater:**

**Sidetall:** 14 pluss vedlegg

**Pris:** 105 kr

**Feltarbeid utført:** 2023

**Rapportdato:** 24.05.2024

**Prosjektnr:** 405400

**Ansvarlig:** Kjersti Løvseth Ruud

**Emneord:** Maringeologi, bunnsedimenter, kornstørrelse, organisk karbon, kjerne, datering

## Sammendrag:

NGU har gjennomført en kartlegging av organisk karbon på sjøbunnen i Stavanger kommune. Målet med prosjektet har vært å øke kunnskapsgrunnlaget om karbonrike sedimenter og potensielle utslipp av karbon i sjøområdene i kommunen. Resultatene skal brukes som faggrunnlag ved utarbeidelse av oppdaterte arealplaner i sjø, slik at kommunen som planmyndighet kan bidra til å ivareta de kystnære sjøområdenes funksjon som karbonlager.

I juni 2023 gjennomførte NGU feltarbeid med F/F Geologen og hentet opp sedimentkjerner og grabbprøver fra førti lokaliteter i Stavanger kommune. Omtrent halve kommunens areal er kartlagt i prosjektet. Valg av prøvetakingsutstyr var avhengig av forventet bunntype. Basert på de innhentede prøvene ble tørr romvekt, innhold av organisk karbon og karbonreaktivitetsindeks (som uttrykker andelen av labilt organisk karbon) analysert i overflatesedimentene (de øverste 10 centimeterne av sjøbunnen). Analyseresultatene ble brukt til å lage kart over mengde organisk karbon og labilt (organisk karbon som brytes ned raskt) organisk karbon ved hjelp av maskinlæring. Vi estimerer at det finnes omtrent 83 000 tonn organisk karbon i de øverste ti centimeterne i det kartlagte området. Derav er 25 000 tonn labilt organisk karbon. Karbonlagrene varierer fra område til område, og er høyest i midtre deler av Mastrafjorden. Arealer med mye labilt organisk karbon er mer utsatt for karbonutslipp som resultat av menneskelige aktiviteter.

Basert på ti sedimentkjerner tatt på toktet med F/F Geologen og to kjerner fra Knies m.fl. (2021) har vi beregnet akkumulasjonsrater for organisk karbon. Akkumulasjonsratene varierer mellom 18,7 og 82,5 g/m<sup>2</sup>/år, med en gjennomsnittsverdi av 44,6 g/m<sup>2</sup>/år. Gjennomsnittlige akkumulasjonsrater for organisk karbon er større enn i Trondheimsfjorden, men lavere enn i Ofotfjorden, Tysfjorden og Vestfjorden. Basert på den gjennomsnittlige akkumulasjonsraten beregner vi at det avsettes 2163 tonn organisk karbon per år i områder med avsetning fra suspensjon.

## Innhold

1. Innledning	4
2. Prøvetaking, data og metodikk	5
3. Resultater	9
3.1 Karbonlager	9
3.2 Akkumulasjonsrater for organisk karbon	11
4. Oppsummering	13

## 1. INNLEDNING

NGU har gjennomført en kartlegging av organisk karbon i sjøbunnsedimenter i Stavanger kommune. Målet med prosjektet har vært å øke kunnskapsgrunnlaget om karbonrike sedimenter og mulige utslipp av karbon i sjøområdene i kommunen. Resultatene skal brukes som faggrunnlag ved utarbeidelse av oppdaterte arealplaner i sjø, slik at kommunen som planmyndighet kan bidra til å ivareta de kystnære sjøområdenes funksjon som karbonlager. Undersøkelsene er en videreføring av arbeid utført i havbunnskartleggingsprosjektet *Marine grunnkart i kystsonen* (se NGU-rapport 2021.003 *Sedimentasjonsmiljø og historisk utvikling i forurensningsstatus i sjøområdene i Stavanger kommune* (Knies m.fl. 2021)). All kart fra dette prosjektet er publisert på [www.ngu.no](http://www.ngu.no) (NGU, 2024).

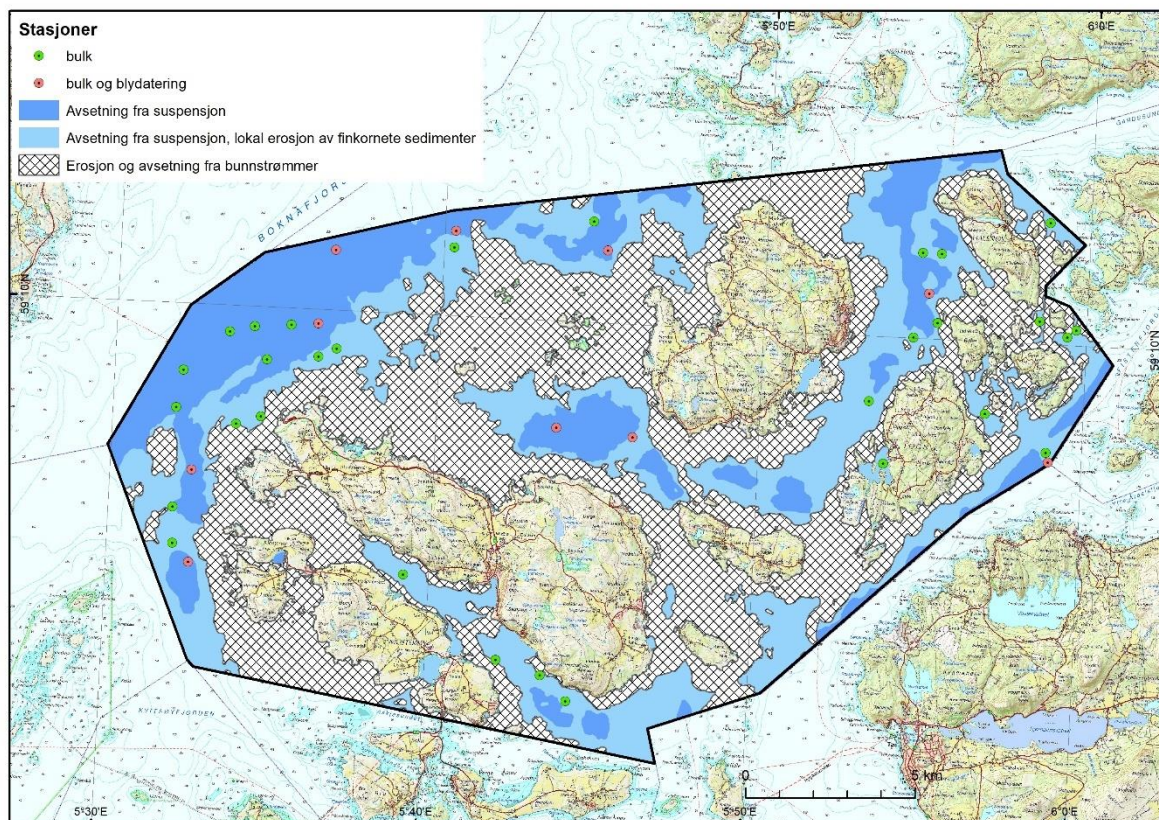
Innholdet av organisk karbon i havbunnsedimenter varierer mye, og er avhengig av ulike faktorer som f.eks. avstand til kilder og kornstørrelsen til bunnsedimentene. Det er kjent at finkornete sedimenter ofte viser et høyt innhold av organisk karbon, mens sedimenter som hovedsakelig består av sand eller grus har et veldig lavt innhold av organisk karbon.

Organisk karbon kan grovt sett være av marin eller terrestrisk opprinnelse. CO<sub>2</sub> tas opp av plankton og kystnær vegetasjonen i havet som tang, tare og ålegras gjennom fotosyntesen. Organisk karbon bundet i plankton og planter går inn i næringskjeden i havet. Det meste av organisk karbon som produseres blir konsumert av mikroorganismer og dyr, og blir til slutt omdannet til uorganisk CO<sub>2</sub> gjennom mineralisering. En mindre andel synker ned til havbunnen i form av døde planter og dyr, og blir lagret i sedimentene. Dette omtales som marint organisk karbon. I tillegg finnes det en del organisk karbon av terrestrisk opprinnelse (f.eks. jord, plantestrø og ved) i bunnsedimenter.

Organisk karbon er et fellesnavn for mange forskjellige organiske forbindelser, f.eks. proteiner, sukker, lipider, lignin mm. Nedbrytingen av disse forbindelsene skjer med veldig ulike hastigheter. Det som nedbrytes relativt raskt kalles labilt organisk karbon. Andre forbindelser er vanskeligere å bryte ned, og disse omtales som *recalcitrant* eller *refractory* på engelsk. Det er mulig å måle andelene av disse tre reaktivitetsklassene av organisk karbon (Smeaton og Austin, 2022).

Stavanger kommune ønsker ikke bare å kvantifisere mengden organisk karbon på sjøbunnen, men også i hvor stor grad karbonet er utsatt for mineralisering ved oppvirvling i vannsøylen ved fysiske inngrep på sjøbunnen, jf. metodikk angitt i Smeaton og Austin (2022). Det er arealer med store mengder av labilt organisk karbon som er mest utsatt for utslipp ved menneskelige aktiviteter. Det er ennå ikke mulig å kvantifisere hvor mye organisk karbon omsettes til CO<sub>2</sub> ved menneskelige forstyrrelser.

I tidligere prosjekter har NGU publisert detaljerte, tolkede kart over bunnsedimenter i sjøområdene i Stavanger kommune (NGU, 2024). Kartene viser blant annet kornstørrelse (ulike kategorier av fin- eller grovkornede sedimenter, blandede bunntyper eller fast fjell) og avsetningsmiljø (hvorvidt sedimenter samler seg opp på havbunnen eller transporteres vekk). Høyt innhold av organisk karbon er knyttet til finkornete sedimenter som avsettes i beskyttede områder med lite påvirkning fra havstrømmer og bølger. I dette prosjektet har vi derfor fokusert på undersøkelser av områder kartlagt som 'Avsetning fra suspensjon' eller 'Avsetning fra suspensjon, lokal erosjon av finkornete sedimenter' i kart over sedimentasjonsmiljø (Figur 1). Områder dominert av erosjon eller avsetning fra bunnstrømmer blir dermed utelukket, siden vi ikke kan forvente særlig store mengder av organisk karbon her. Vi har så langt som mulig kvantifisert karbonlager ved hjelp av romlig modellering, etter metodikk som beskrevet i Diesing m.fl. (2021). Når vi snakker om karbonlager, mener vi masse (kg) av organisk karbon per kvadratmeter ned til ti cm dybde i sedimentet.



Figur 1. Lokalteter med sedimentprøver fra sjøbunnen tatt for kartlegging av karbonlager (bulk) og akkumulasjonsrater for organisk karbon (blydatering). Bakgrunnskartet er basert på kart over sedimentasjonsmiljø publisert i prosjektet Marine grunnkart i kystsonen (NGU, 2024).

I tillegg har vi beregnet hvor mye organisk karbon som avsettes per år, basert på blydatering av sedimentkjerner med uforstyrrede sedimenter. Dette kan kun utføres på finkornete sedimenter dominert av slam (leir og silt) som avsettes i fjordbassenger på en rolig og kontinuerlig måte. Analyse av akkumulasjonsrater for organisk karbon er derfor begrenset til områder kartlagt som 'Avsetning fra suspensjon' (Figur 1) der vi kan forvente uforstyrret avsetning.

## 2. PRØVETAKING, DATA OG METODIKK

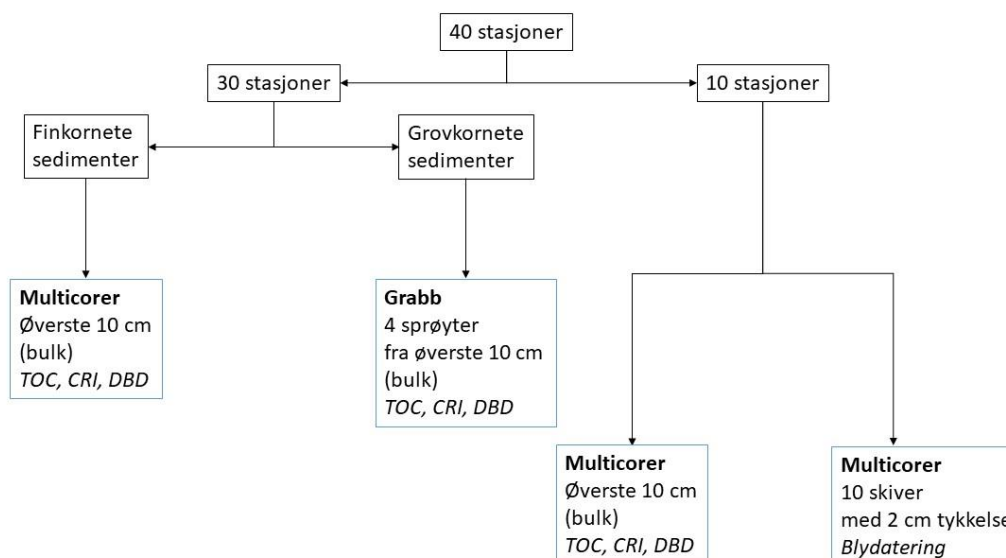
Før toktet startet ble 40 prøvetakingsstasjoner plassert på en tilfeldig måte (Figur 1). I romlig modellering er dette viktig for å utelukke subjektivitet og få gode modellresultater. I tillegg ble prosjektområdet inndelt i underområder med antatt lignende egenskaper (stratifisert) basert på kornstørrelse (ti klasser) og dybde (tre klasser: grunn, mellomdyp, dyp) for å fange opp mest mulig miljøvariasjon. Totalt 24 av de 30 teoretisk mulige kombinasjonene av dybde- og kornstørrelsesklasser fantes i studieområdet og ble definert som egne strata. Noen av disse var veldig små ( $<1 \text{ km}^2$ ), og ble derfor sammenslått med lignende, tilgrensende strata. Antall prøvestasjoner per stratum ble bestemt av areal, dvs. at flere stasjoner ble plassert i strata med større areal. Et stratum ("Slam/sand og stein/blokk på grunt vann") med et areal på  $0,000002 \text{ km}^2$  fikk ingen prøvestasjon. Plasseringen av stasjonene tok i betraktning områder der det ikke ville være mulig å ta prøver, som i militære forbudsområder og nær akvakulturanlegg.

I juni 2023 gjennomførte NGU feltarbeid med F/F Geologen, og hentet opp korte sedimentkjerner og grabbprøver fra de utpekte lokalitetene. Valg av prøvetakingsutstyr (multicorer eller grabb) var avhengig av bunntypen på hver stasjon. NGUs multicorer, som ble brukt til prøvetaking av homogene, finkornige sedimenter (slam og sandholdig slam), var utstyrt med fire rør på 60 cm lengde med diameter 6,3 cm (Figur 2a). Rørene lukkes i topp og bunn idet prøven tas, slik at hver kjerneprøve kommer opp med en uforstyrret sedimentoverflate. I grovere bunntyper med større andel sand og innhold av grus ble prøvene tatt med Van Veen-grabb (Figur 2b).



Figur 2. Prøvetaking. a) NGUs multicorer. b) Van Veen-grabb. c) Grabb med fire sprøyteprøver hver ti centimeter lange. d) En sedimentkjerne fra multicorer skives med plastspatler.

Bulkprøver av de øverste 10 cm sediment ble tatt ut på hver stasjon. Når multicoreren ble brukt, ble de øverste ti cm skåret av med plastspatler og frosset ned i plastposer. Under bruk av grabb ble fire sprøyteprøver à ti cm lengde tatt ut, samlet i en plastpose og frosset ned (Figur 2c). På ti av de 40 stasjonene ble det i tillegg tatt prøver til blydatering. Her ble en sedimentkjerne fra multicorer skåret i skiver à 2 cm ned til 20 cm sedimentdybde (Figur 2d). Skivene ble pakket separat i plastposer og frosset ned etter veiing. Figur 3 viser prøvetakingskjemaet.



Figur 3. Flyttdiagram som viser hvordan prøvene ble tatt. TOC – totalt innhold av organisk karbon, CRI – karbonreaktivitetsindeks, DBD – tørr romvekt (dry bulk density)

Etter gjennomført feltarbeid ble alle prøver sendt i frosset tilstand til NGU-Lab. Her ble prøvene frysetørket og videre analysert. Tørr romvekt (DBD, *dry bulk density*) kan beregnes ut fra totalt vanninnhold i en prøve (Flemming og Delafontaine 2000). Totalt organisk karbon (TOC) ble målt ved hjelp av Leco SC-632 forbrenningsovn. Karbonreaktivitetsindeksen (CRI) ble bestemt med termogravimetrisk analyse av Craig Smeaton ved University of St. Andrews, Skottland (Smeaton og Austin, 2022). Kornfordeling mellom 0,4  $\mu\text{m}$  og 2 mm ble målt med Coulter laserdiffraksjon ved Universitetet i Tromsø. Åtte prøver ble i tillegg våtsiktet på NGU-Lab, og det ble laget kombinerte kornfordelingskurver. Prøver til datering ble sendt til Gamma Dating Center Copenhagen ved Universitetet i København, der aktiviteten til isotopene  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  og  $^{137}\text{Cs}$  ble analysert med gammaspespektrometri. Basert på radiometriske data kunne sedimentenes alder i ulike sedimentdybder bestemmes, og dermed også masseakkumulasjonsratene for hver analysert kjerneprøve (se vedlegg).

Basert på tørr romvekt (DBD), totalt innhold av organisk karbon (TOC) og sedimentdybde ( $d = 0,1 \text{ m}$ ) beregnes karbonlager (OCS):

$$OCS (kg/m^2) = \frac{TOC (\%)}{100} \cdot 1000 \cdot DBD (g/cm^3) \cdot d(m)$$

Karbonlager av labilt organisk karbon ( $OCS_{lab}$ ) beregnes slik:

$$OCS_{lab} (kg/m^2) = (1 - CRI) \cdot \frac{TOC (\%)}{100} \cdot 1000 \cdot DBD (g/cm^3) \cdot d(m)$$

Akkumulasjonsratene for organisk karbon (OCAR) kan beregnes ut fra masseakkumulasjonsrater (MAR) og organisk karboninnhold (TOC):

$$OCAR (g/m^2/yr) = 1000 \cdot MAR (kg/m^2/yr) \cdot \frac{TOC (\%)}{100}$$

Ved romlig prediksjon bruker man modellerte sammenhenger for å estimere karbonlager i hele studieområdet. Basert på data innsamlet fra de 40 bulk-stasjonene kunne vi lage romlige modeller av karbonlager både for organisk karbon og labilt organisk karbon. Metoden som ble brukt var en videreutvikling av den som er beskrevet i Diesing m.fl. (2021), og er basert på maskinlæring. Kort sagt lages det en data-drevet modell av sammenhengene mellom det som skal kartlegges (karbonlager) og det som kalles for prediksjonsvariabler, som foreligger som



flatedekkende rasterfiler. Prediksjonsvariablene som ble brukt var vanddybde, bunnreflektivitet (begge målt med ekkolodd), avstand fra kyst, sedimentfraksjoner (slam, sand, grus, stein/blokk, fjell) avledet fra tolkede kart over bunnsedimenter, saltholdighet, vanntemperatur, strømhastighet og bølgepåvirkning basert på Havforskningsinstituttets strømmmodell (bølgeomodell) for norske fjorder og kystområder. For å optimere modellkvaliteten lot vi en optimeringsalgoritme velge ut den endelige kombinasjonen av prediksjonsvariabler som skulle brukes. Resultatene ble nedjustert i områder der bunnen inneholder stein, blokk og fjell, siden det ikke forventes organisk karbon assosiert med grovkornete bunnsedimenter.

For å lage en troverdig romlig modell trengs det et visst antall prøver. Siden det var bare ti stasjoner med målte akkumulasjonsrater for organisk karbon var dette ikke mulig. I stedet har vi estimert mengden organisk karbon som avsettes per år i områder kartlagt som *Avsetning fra suspensjon* (Figur 1), basert på en gjennomsnittlig verdi av akkumulasjonsrater og områdestørrelse (48,5 km<sup>2</sup>).

### 3. RESULTATER

#### 3.1 Karbonlager

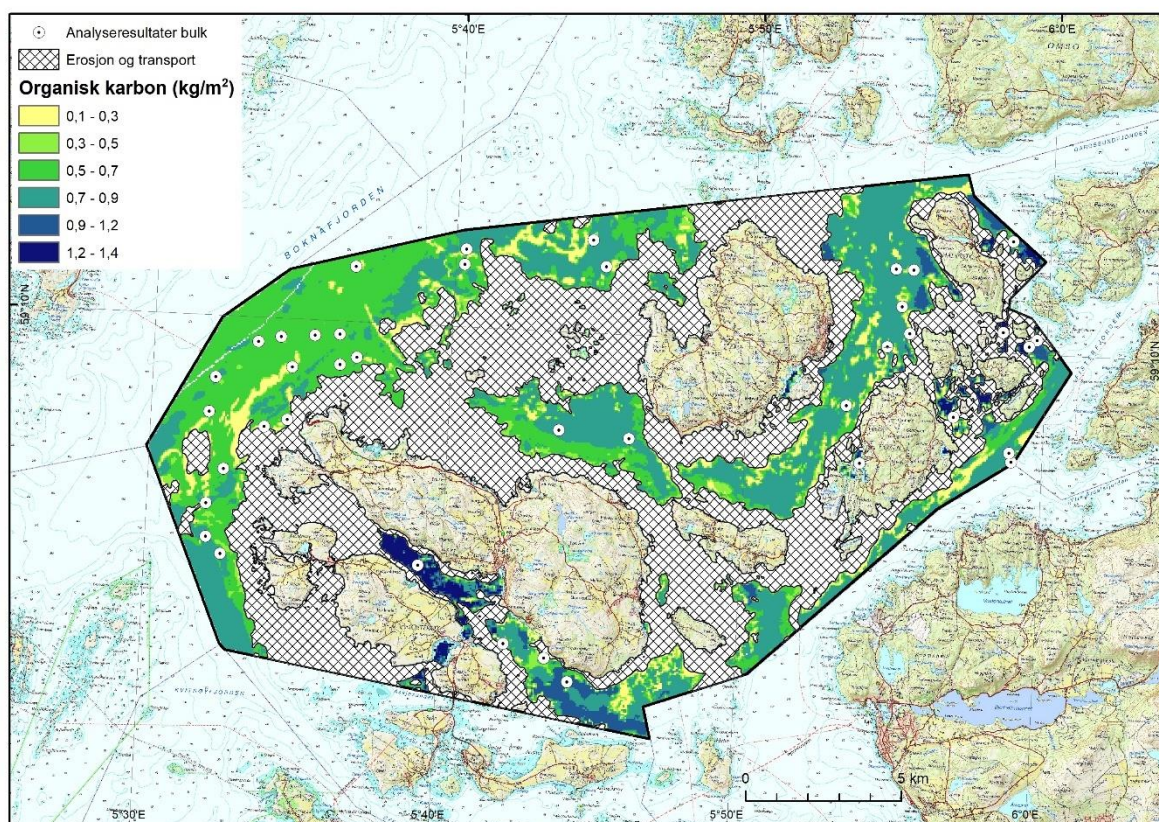
Basert på målinger av tørr romvekt, organisk karboninnhold og karbonreaktivitetsindeksen i de øverste ti centimeterne av prøvene tatt på førti bulk-stasjoner (Tabell 1) ble karbonlagrene av organisk karbon og labilt organisk karbon estimert med romlig prediksjon.

Tabell 1. Analyseresultater av førti bulk-prøver: Tørr romvekt (DBD), totalt innhold av organisk karbon (TOC) og karbonreaktivitetsindeks (CRI).

Stasjon	Geografiske koordinater		Vanndyp (m)	Prøvetaker	DBD (g/cm <sup>3</sup> )	TOC (vekt-%)	CRI
	Nord	Øst					
P2302001	59,13917	5,53271	576	Multicorer	0,34	1,9	0,74
P2302002	59,14913	5,53546	578	Multicorer	0,41	2,04	0,75
P2302003	59,15989	5,55839	573	Multicorer	0,26	2,11	0,7
P2302004	59,16161	5,57106	570	Multicorer	0,29	2,14	0,71
P2302005	59,16252	5,58987	515	Multicorer	0,28	2,1	0,71
P2302006	59,16320	5,60376	375	Multicorer	0,33	2,05	0,73
P2302007	59,18287	5,61084	540	Multicorer	0,29	2,14	0,7
P2302008	59,15305	5,57812	553	Grabb	0,33	2,02	0,73
P2302009	59,15444	5,60458	222	Grabb	0,79	0,68	0,8
P2302010	59,15681	5,61386	184	Grabb	0,97	0,65	0,81
P2302011	59,13790	5,57656	137	Grabb	0,99	0,74	0,74
P2302012	59,13561	5,56396	119	Grabb	1,08	0,59	0,75
P2302013	59,12286	5,54225	382	Multicorer	0,35	1,95	0,74
P2302014	59,11284	5,53347	247	Multicorer	0,62	1,14	0,78
P2302015	59,10321	5,53428	253	Multicorer	0,49	1,57	0,77
P2302016	59,09843	5,54293	286	Multicorer	0,41	1,94	0,75
P2302017	59,09794	5,65372	61	Grabb	0,62	2,21	0,58
P2302018	59,07659	5,70360	42	Grabb	1,35	0,27	0,63
P2302019	59,07304	5,72667	69	Grabb	1,19	0,67	0,64
P2302020	59,06652	5,74036	101	Grabb	0,38	3,77	0,62
P2302021	59,13725	5,76842	183	Multicorer	0,53	1,51	0,73
P2302022	59,13876	5,72891	207	Multicorer	0,46	1,71	0,72
P2302023	59,13569	5,98276	268	Multicorer	0,3	2,44	0,62
P2302024	59,13822	5,98155	230	Grabb	0,53	1,71	0,66
P2302025	59,14779	5,94939	71	Grabb	1,02	1,46	0,61
P2302026	59,19906	5,97889	91	Grabb	1,08	0,8	0,69
P2302027	59,17284	5,97539	64	Grabb	0,65	2,33	0,59
P2302028	59,17095	5,99448	93	Grabb	0,85	1,41	0,63
P2302029	59,16896	5,99014	92	Multicorer	0,64	1,74	0,63
P2302030	59,17894	5,91793	205	Multicorer	0,49	1,65	0,7
P2302031	59,18964	5,91366	222	Multicorer	0,41	1,91	0,69
P2302032	59,17126	5,92285	120	Grabb	0,73	1,5	0,68
P2302033	59,13338	5,89813	38	Multicorer	0,63	2,13	0,56
P2302034	59,14973	5,88929	182	Grabb	0,5	1,75	0,71
P2302035	59,16716	5,91068	188	Grabb	0,62	1,3	0,71
P2302036	59,18954	5,92351	207	Grabb	0,67	1,01	0,72
P2302037	59,19381	5,74319	272	Grabb	0,58	1,3	0,77
P2302038	59,18512	5,67186	261	Grabb	0,42	1,68	0,76
P2302039	59,18634	5,75105	280	Multicorer	0,34	2,05	0,73
P2302040	59,18949	5,67236	333	Multicorer	0,34	2,25	0,72

Karbonlagrene av organisk karbon varierer mellom 0,1 og 1,4 kg per m<sup>2</sup> i de øverste ti cm av bunnsedimentene (Figur 4). Karbonlagrene er høyest i midtre delen av Mastrafjorden mellom Rennesøy og Mosterøy, og i noen små områder i den østlige delen av området. Karbonlagrene er relativt lave i store deler av Boknafjorden. Dette kan muligens forklares med at fjorden er så dyp at organisk karbon fra vannoverflaten får lengre transportvei ned til bunnen, og dermed mer tid til å mineraliseres av mikroorganismer. En annen mulig forklaring kan være at de relativt høye sedimentasjonsratene i Boknafjorden fører til en fortynningseffekt. Karbonlagrene er lavest (gul farge i Figur 4) i områder tidligere kartlagt av NGU som *Tynt eller usammenhengende sedimentdekke over berggrunn*.

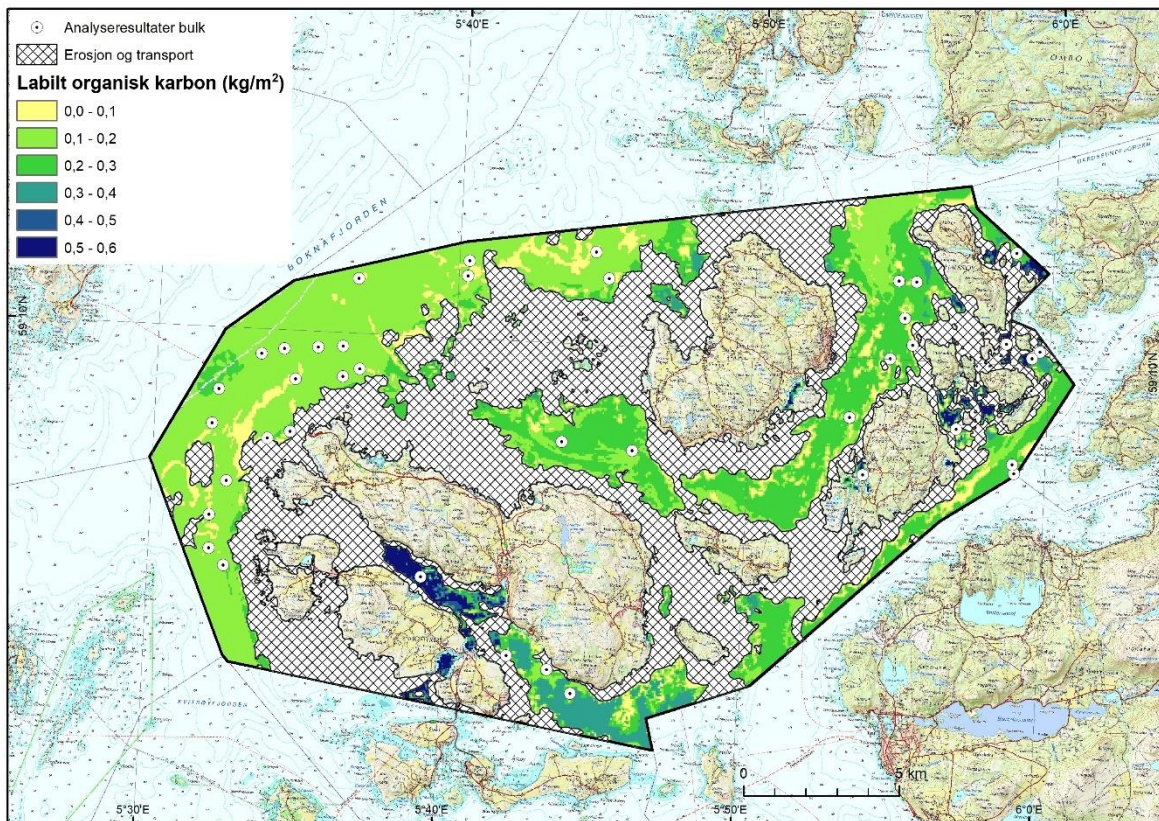
Totalt estimerer vi at det finnes omtrent 83 000 tonn organisk karbon i de øverste ti cm av havbunnen i prosjektområdet. Dette tilsvarer 305 000 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.



Figur 4. Karbonlager av organisk karbon i de øverste ti cm av havbunnen i prosjektområdet.

Karbonlagrene av labilt organisk karbon (Figur 5) er lavere enn karbonlagrene av organisk karbon (Figur 4). Karbonlagrene varierer mellom litt over 0 og 0,6 kg per m<sup>2</sup> i de øverste ti cm av bunnsedimentene. Det romlige fordelingsmønsteret ligner fordelingen av organisk karbon, med et relativt stort område med høye karbonlager i midtre del av Mastrafjorden og i den østlige delen av undersøkelsesområdet. Igjen er karbonlagrene lave i Boknafjorden, og der bunntypen er kartlagt som *Tynt eller usammenhengende sedimentdekke over berggrunn*.

Totalt finnes det omtrent 25 000 tonn labilt organisk karbon i de øverste ti cm av havbunnen i prosjektområdet. Dette tilsvarer 92 000 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter.



Figur 5. Karbonlager av labilt organisk karbon i de øverste ti cm av havbunnen i prosjektområdet.

### 3.2 Akkumulasjonsrater for organisk karbon

Under feltarbeid med F/F Geologen i juni 2023 hentet NGU opp ti korte sedimentkjerner fra utvalgte lokaliteter i Stavanger kommune (markert som bulk og blydatering) (Figur 1, Tabell 2). I tillegg har vi brukt to kjerner som ble tatt i juni 2020 (Tabell 2). Disse tolv kjernene ble analysert av Gamma Dating Center Copenhagen ved Universitetet i København. Aktiviteten av isotopen  $^{210}\text{Pb}$  ble målt på ulike dybdenivåer i kjernen for å aldersbestemme sedimentene. Resultatene ble understøttet med målinger av isotopen  $^{137}\text{Cs}$ . Når all tilgjengelig aldersinformasjon kombineres, kan en beregne masseakkumulasjonsrater ( $\text{kg/m}^2/\text{år}$ ).

For å få troverdige resultater forutsettes det at sedimentblanding på grunn av gravende bunndyr (bioturbasjon) eller andre prosesser er ubetydelig. Hvis dette er ikke tilfelle vil masseakkumulasjonsratene anslås for høyt. Det var to kjerner (P2302021b og P2302039b) med betydelig blanding og to kjerner (P2302030b og 2302040b) med mulig blanding (Tabell 2), mens resten av kjernene viste ingen tegn på sedimentblanding. De beregnede masseakkumulasjonsratene i kjernene med bioturbasjon er derfor trolig for høye. Samtidig er verdiene lave sammenlignet med data fra kjerner uten blanding (Tabell 2). For å få en mer representativ oversikt av akkumulasjonsratene utelukker vi derfor ikke kjernene med tegn til sedimentblanding.

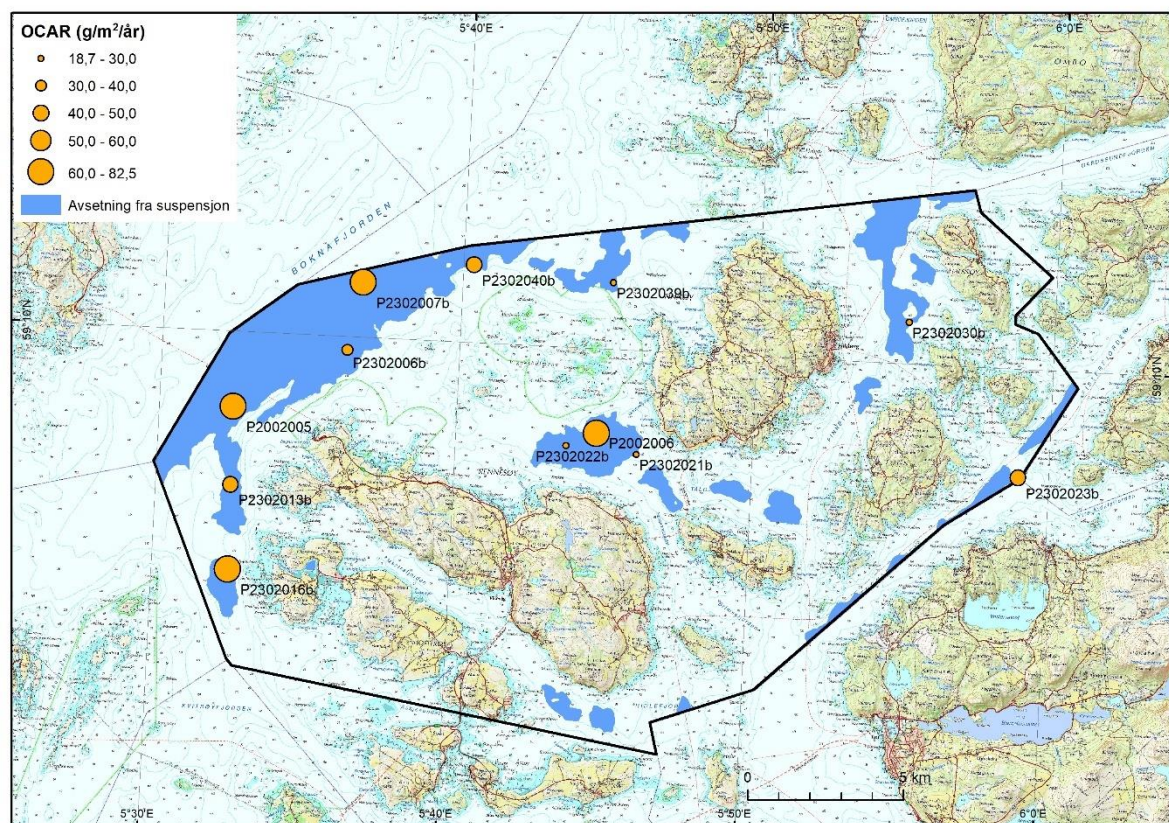
Vi har beregnet gjennomsnittsverdier av masseakkumulasjonsrater fra de øverste ti centimeterne i hver kerne. For å beregne akkumulasjonsrater for organisk karbon ganger en masseakkumulasjonsrater med organisk karboninnhold (Tabell 2).

Akkumulasjonsratene for organisk karbon varierer fra 18,7 til 82,5  $\text{g/m}^2/\text{år}$  (Tabell 2). Akkumulasjonsraten er lavest på stasjon P2302022b og høyest på stasjon P2002006, begge fra det samme sedimentbassenget i Talgjefjorden mellom Finnøy og Rennesøy. Stasjonene ligger bare én kilometer fra hverandre (Figur 6), noe som antyder at akkumulasjonsrater kan variere

sterkt over kort avstand. Akkumulasjonsratene for organisk karbon har en tendens å øke med økende vanndybden.

Tabell 2. Masseakkumulasjonsrater (MAR), totalt innhold av organisk karbon (TOC) og akkumulasjonsrater for organisk karbon basert på blydateringer. I tillegg til de ti kjemene som ble analysert i dette oppdraget er det inkludert to kjerner fra Knies m.fl. (2021).

Kjerne	MAR (kg/m <sup>2</sup> /år)	TOC (vekt-%)	OCAR (g/m <sup>2</sup> /år)	Kommentar
P2302006b	1,84	2,05	37,76	
P2302007b	2,83	2,14	60,52	
P2302013b	2,44	1,95	47,62	
P2302016b	3,32	1,94	64,49	
P2302021b	1,6	1,51	24,19	Sannsynligvis for høyt pga. sedimentblanding
P2302022b	1,09	1,71	18,71	
P2302023b	1,64	2,44	40,11	
P2302030b	1,43	1,65	23,56	Mulig sedimentblanding
P2302039b	1,05	2,05	21,53	Sannsynligvis for høyt pga. sterk blanding
P2302040b	1,82	2,25	40,95	Mulig sedimentblanding
P2002005	3,03	2,41	72,9	Knies m.fl. (2021)
P2002006	2,92	2,83	82,54	Knies m.fl. (2021)



Figur 6. Akkumulasjonsrater for organisk karbon (OCAR) målt innenfor områder kartlagt som Avsetning fra suspensjon.

Den gjennomsnittlige akkumulasjonsraten for organisk karbon er 44,6 g/m<sup>2</sup>/år i den kartlagte delen av Stavanger kommune. Det finnes få fjordområder i Norge med et tilsvarende antall målinger av karbonakkumulasjonsrater. Akkumulasjonsraten i Stavanger kommune er større enn

gjennomsnittlige verdier i Trondheimsfjorden, der det er målt 19,7 g/m<sup>2</sup>/år, men lavere enn i Ofotfjorden, Tysfjorden og Vestfjorden, der det er målt 73,6 g/m<sup>2</sup>/år (Faust og Knies, 2019).

Totalt 48,5 km<sup>2</sup> av prosjektområdet er kartlagt som område med avsetning fra suspensjon. Basert på dette estimerer vi at det lagres 2 163 tonn organisk karbon per år på havbunnen i prosjektområdet. Dette tilsvarer 7 939 tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter per år.

#### **4. OPPSUMMERING**

Basert på førti prøver innsamlet på NGU-tokt 2302 med F/F Geologen i Stavanger kommune er havbunnsedimenter (de øverste ti cm av havbunnen) analysert mht. tørr romvekt, innhold av organisk karbon og karbonreaktivitets-indeks. Analyseresultatene er brukt til å modellere karbonlager av organisk karbon og labilt organisk karbon ved hjelp av maskinlæring.

Vi estimerer at det finnes omtrent 83 000 tonn organisk karbon i de øverste ti cm av havbunnen i prosjektområdet. Av dette er 25 000 tonn labilt organisk karbon. Karbonlagrene viser en tydelig romlig variasjon, og er høyest i den midtre delen av Mastrafjorden. Det er arealer med store mengder av labilt organisk karbon som er mest utsatt for utslipp ved menneskelige aktiviteter.

Basert på ti sedimentkjerner tatt på NGU-tokt 2302 og to kjerner fra Knies m.fl. (2021) har vi beregnet akkumulasjonsrater for organisk karbon. Akkumulasjonsratene varierer mellom 18,7 og 82,5 g/m<sup>2</sup>/år, med en gjennomsnittsverdi på 44,6 g/m<sup>2</sup>/år. Den gjennomsnittlige akkumulasjonsraten for organisk karbon er større enn i Trondheimsfjorden, men lavere enn i Ofotfjorden, Tysfjorden og Vestfjorden. Basert på gjennomsnittlig akkumulasjonsrate beregner vi at det avsettes 2163 tonn organisk karbon per år i områder med avsetning fra suspensjon.

## REFERANSER

Diesing, M., Thorsnes, T. & Bjarnadóttir, L. R. (2021). Organic carbon densities and accumulation rates in surface sediments of the North Sea and Skagerrak. *Biogeosciences*, 18(6), 2139–2160. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2139-2021>

Faust, J. C. & Knies, J. (2019). Organic Matter Sources in North Atlantic Fjord Sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(6), 2872–2885. <https://doi.org/10.1029/2019GC008382>

Flemming, B. W. & Delafontaine, M. T. (2000). Mass physical properties of muddy intertidal sediments: some applications, misapplications and non-applications. *Continental Shelf Research*, 20(10), 1179–1197. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00018-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00018-2)

Knies, J., Elvenes, S. & Bøe, R. (2021). *Sedimentasjonsmiljø og historisk utvikling i forurensingsstatus i sjøområdene i Stavanger kommune*. NGU rapport 2021.003, 84 sider.

NGU (2024). Norges geologiske undersøkelse, Trondheim, Norge, [https://geo.ngu.no/kart/marin\\_mobil/](https://geo.ngu.no/kart/marin_mobil/) [accessed 23. Mai 2024].

Smeaton, C. & Austin, W. E. N. (2022). Quality Not Quantity: Prioritizing the Management of Sedimentary Organic Matter Across Continental Shelf Seas. *Geophysical Research Letters*, 49(5), e2021GL097481. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL097481>

VEDLEGG

**Rapporter fra Gamma Dating Center Copenhagen**



# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, March 20<sup>th</sup>, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen  
Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)  
University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10  
1350 Copenhagen K  
e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)  
phone +45 35 32 25 03  
fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302006b**

## **Dating of core P2302006b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma-spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around  $300 \text{ Bq kg}^{-1}$  with a clear tendency for exponential with depth.

The calculated flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is  $550 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  which is about four to five times higher than the expected flux (based on data shown in Appleby, 2001). This indicates that the site is subject to intense sediment focusing.

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and showed no distinct peaks.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2. The result is given in table 2 and fig 3 and 4.

The chronology given in table 2 is only valid if bioturbation and other sediment mixing is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated. The exponential decrease in the content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  gives confidence in the result but the chronology cannot be verified by means of the  $^{137}\text{Cs}$  data as the core only reaches back to late 1980's. The  $^{210}\text{Pb}$ -based chronology is therefore considered to be reliable but it is not verified by independent data.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

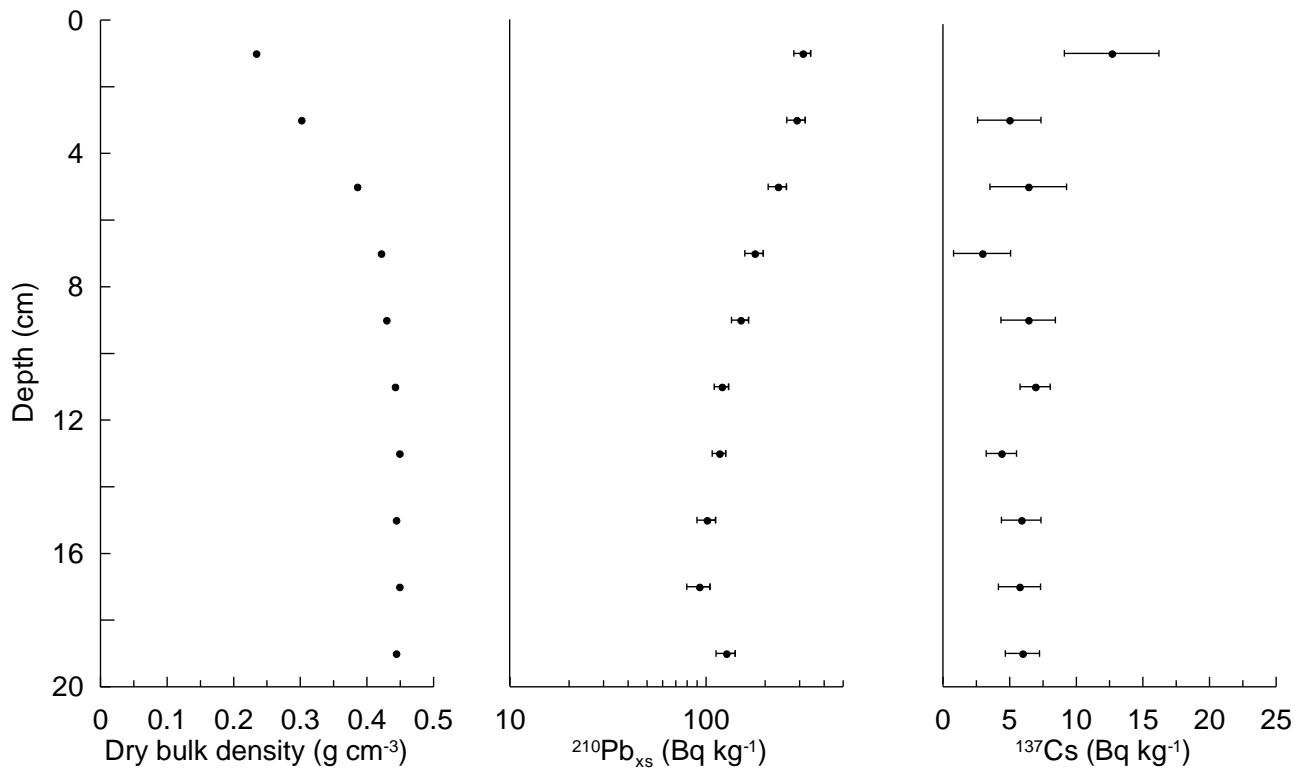
Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

Table 1. Radiometric data, P2302006b

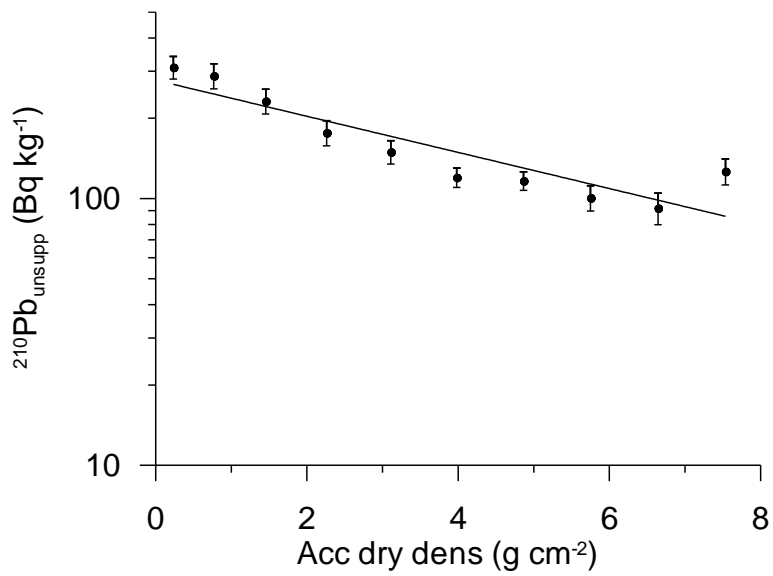
Depth	Pb-210 <sub>tot</sub>	error Pb-210 <sub>tot</sub>	Pb-210 <sub>sup</sub>	error pb-210 <sub>sup</sub>	Pb-210 <sub>unsup</sub>	error pb-210 <sub>unsup</sub>	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>
1.0	331	26	20	4	311	30	13	4
3.0	310	23	21	9	289	31	5	2
5.0	246	20	14	5	232	25	6	3
7.0	195	15	19	4	177	19	3	2
9.0	168	13	19	2	150	15	6	2
11.0	141	10	21	1	120	10	7	1
13.0	137	9	21	1	117	9	4	1
15.0	121	9	20	2	101	11	6	1
17.0	116	9	24	4	92	12	6	2
19.0	148	10	21	4	127	14	6	1

Table 2, chronology core, P2302006b

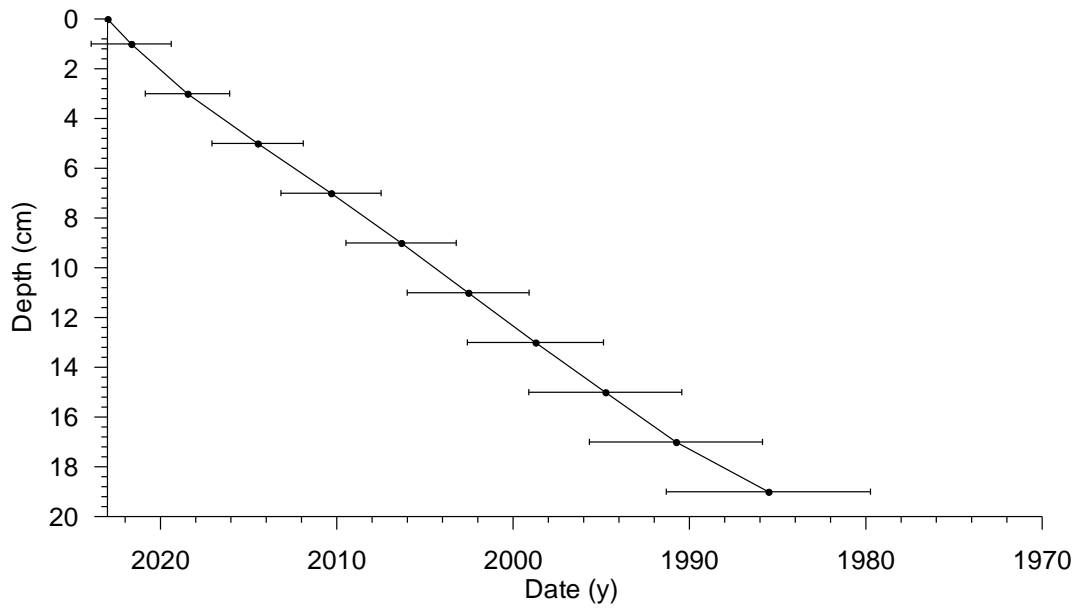
Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			2023		
1.0	1	2	2022	1.73	0.20
3.0	5	2	2018	1.68	0.21
5.0	9	3	2014	1.72	0.23
7.0	13	3	2010	1.94	0.27
9.0	17	3	2006	2.14	0.31
11.0	20	3	2003	2.29	0.33
13.0	24	4	1999	2.32	0.36
15.0	28	4	1995	2.24	0.41
17.0	32	5	1991	2.23	0.47
19.0	37	6	1986	1.70	0.34



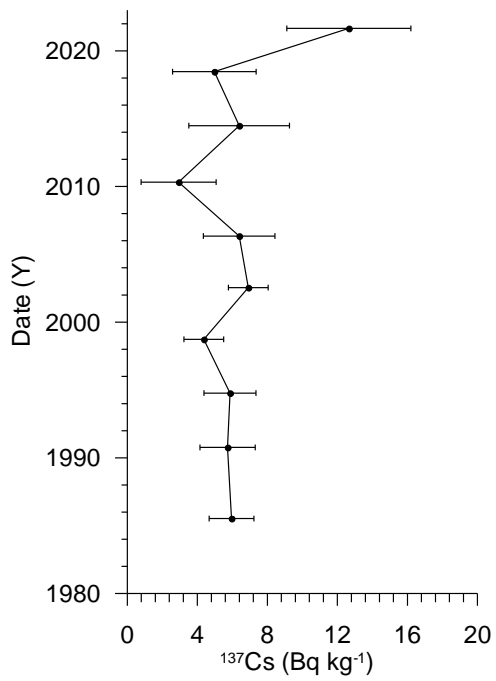
**Fig 7.** Radiometric data



**Fig 2.** Regression of unsupported <sup>210</sup>Pb vs accumulated dry density.



**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 4.** <sup>137</sup>Cs profile as dated by <sup>210</sup>Pb-dating

# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, March 22nd, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen**  
**Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)**  
**University of Copenhagen**  
**Oester Voldgade 10**  
**1350 Copenhagen K**  
**e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)**  
**phone +45 35 32 25 03**  
**fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302007b**

## **Dating of core P2302007b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma-spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around  $300 \text{ Bq kg}^{-1}$  with a clear tendency for exponential with depth (fig 1).

The calculated flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is  $855 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  which is about five to six times higher than the expected flux (based on data shown in Appleby, 2001). This shows that the site is subject to intense sediment focusing.

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and showed no distinct peaks but a slight increase downcore.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2. The result is shown in table 2 and fig 3 and 4.

The chronology given in table 2 is only valid if bioturbation and other sediment mixing is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated. The exponential decrease in the content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  gives confidence in the result and the slightly increasing content of  $^{137}\text{Cs}$  down-core is also consistent with the know pollution record of this isotope. The chronology is therefore considered to be reliable.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

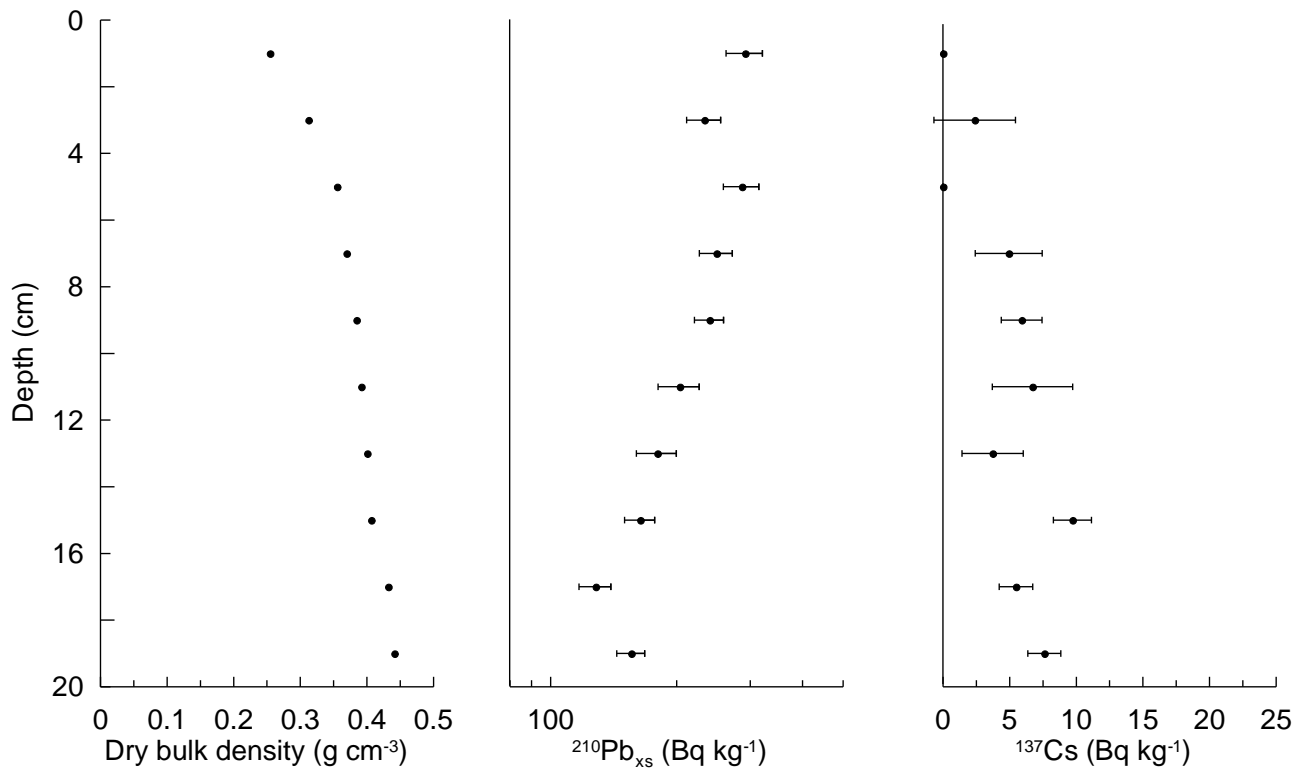
Table 1. Radiometric data, P2302007b

Depth	Pb-210 <sub>tot</sub>	error Pb-210 <sub>tot</sub>	Pb-210 <sub>sup</sub>	error pb-210 <sub>sup</sub>	Pb-210 <sub>unsup</sub>	error pb-210 <sub>unsup</sub>	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>
1.0	316	25	24	4	292	29	0	0
3.0	259	20	26	2	233	22	2	3
5.0	312	22	25	6	287	28	0	0
7.0	275	21	26	2	249	23	5	3
9.0	261	16	21	3	240	19	6	2
11.0	227	19	24	4	204	23	7	3
13.0	203	16	23	4	180	20	4	2
15.0	184	12	20	2	164	13	10	1
17.0	145	10	17	2	128	11	5	1
19.0	178	11	22	1	156	12	8	1

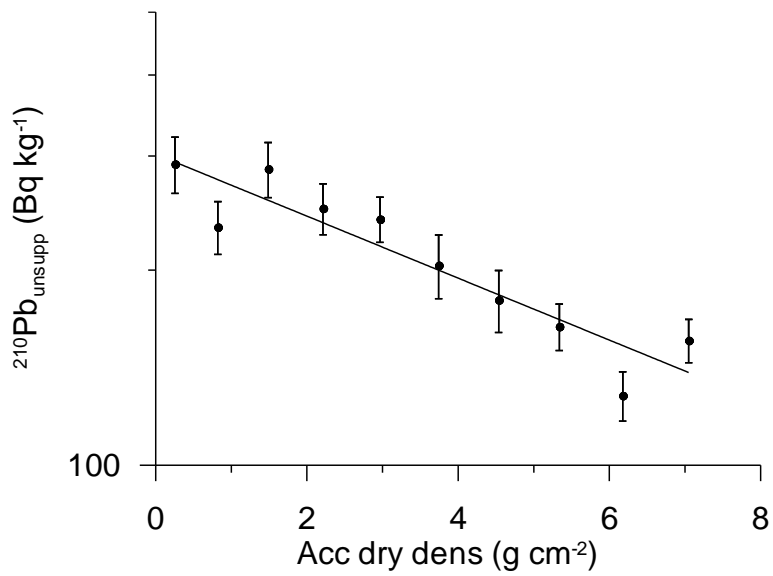
Table 2, chronology core, P2302007b

Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			2023		
1.0	1	3	2022	2.89	0.40
3.0	3	3	2020	3.08	0.42
5.0	5	3	2018	2.92	0.42
7.0	8	4	2015	2.62	0.39
9.0	11	4	2012	2.63	0.40
11.0	14	4	2009	2.65	0.47
13.0	16	4	2007	2.80	0.52
15.0	19	5	2004	2.86	0.53
17.0	22	5	2001	3.09	0.62
19.0	25	6	1998	2.90	0.58

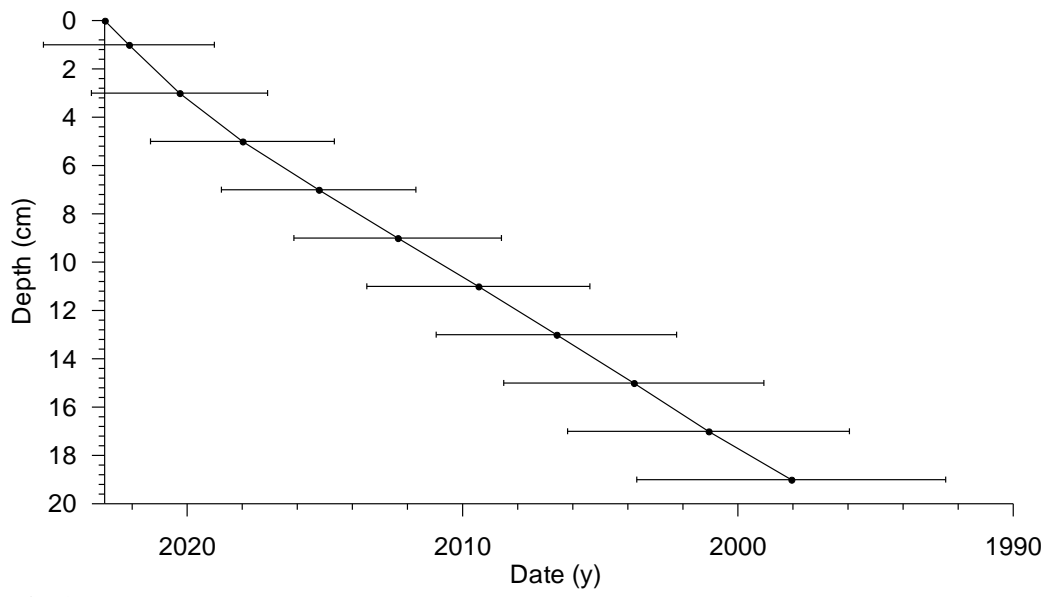




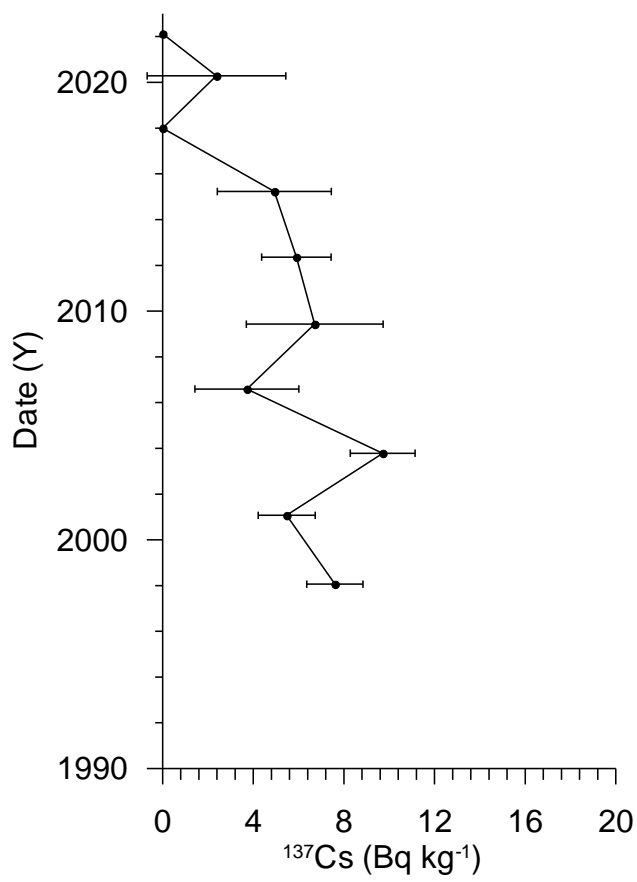
**Fig 8.** Radiometric data



**Fig 2.** Regression of unsupported <sup>210</sup>Pb vs accumulated dry density.



**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 4.** <sup>137</sup>Cs profile as dated by <sup>210</sup>Pb-dating

# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, March 21st, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen**  
**Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)**  
**University of Copenhagen**  
**Oester Voldgade 10**  
**1350 Copenhagen K**  
**e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)**  
**phone +45 35 32 25 03**  
**fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302013b**

## **Dating of core P2302013b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma-spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around  $300 \text{ Bq kg}^{-1}$  with a clear tendency for exponential with depth.

The calculated flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is  $630 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  which is about five times higher than the expected flux (based on data shown in Appleby, 2001). This indicates that the site is subject to intense sediment focusing.

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and showed no distinct peaks.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2. The result is shown in table 2 and fig 3 and 4.

The chronology shown in table 2 is only valid if bioturbation and other sediment mixing is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated. The exponential decrease in the content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  gives confidence in the result but the chronology cannot be verified by means of the  $^{137}\text{Cs}$  data as the core only reaches back to late 1980's. However, the lowermost sample does show somewhat higher content of  $^{137}\text{Cs}$  which is likely due to the Chernobyl accident in 1986. The  $^{210}\text{Pb}$ -based chronology is therefore considered to be reliable.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

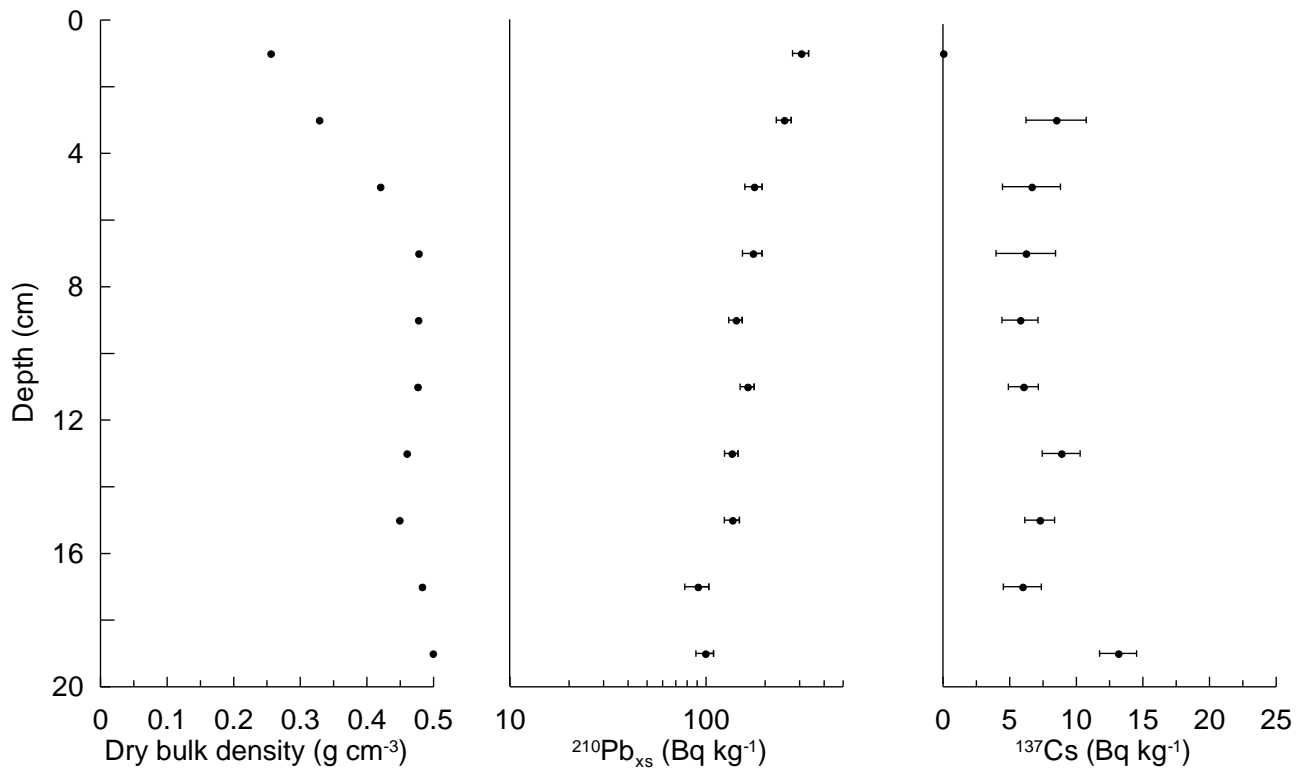
Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

Table 1. Radiometric data, P2302013b

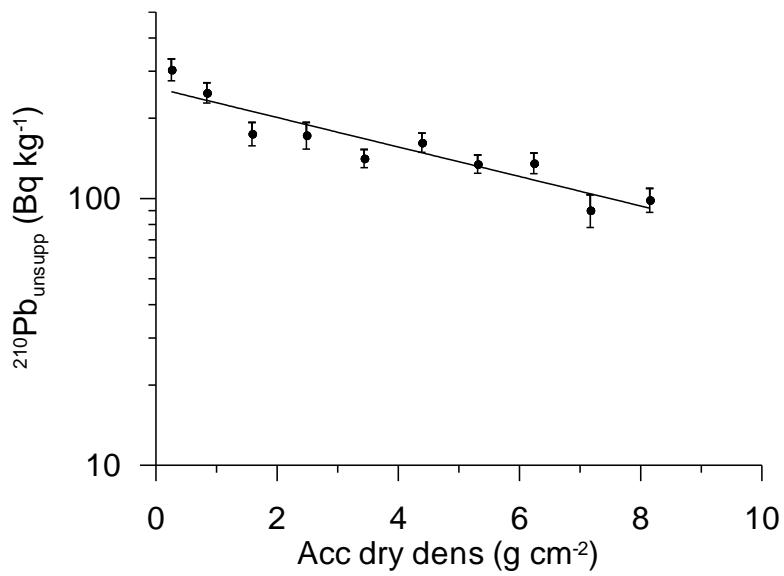
Depth	Pb-210 <sub>tot</sub>	error Pb-210 <sub>tot</sub>	Pb-210 <sub>sup</sub>	error pb-210 <sub>sup</sub>	Pb-210 <sub>unsup</sub>	error pb-210 <sub>unsup</sub>	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>
1.0	326	27	21	2	305	29	0	0
3.0	269	20	19	2	250	22	8	2
5.0	199	16	24	2	175	18	7	2
7.0	191	15	18	5	173	20	6	2
9.0	164	11	22	0	142	11	6	1
11.0	183	11	20	2	162	13	6	1
13.0	151	11	16	0	135	11	9	1
15.0	157	10	21	2	136	12	7	1
17.0	110	8	19	5	91	13	6	1
19.0	122	9	23	1	99	10	13	1

Table 2, chronology core, P2302013b

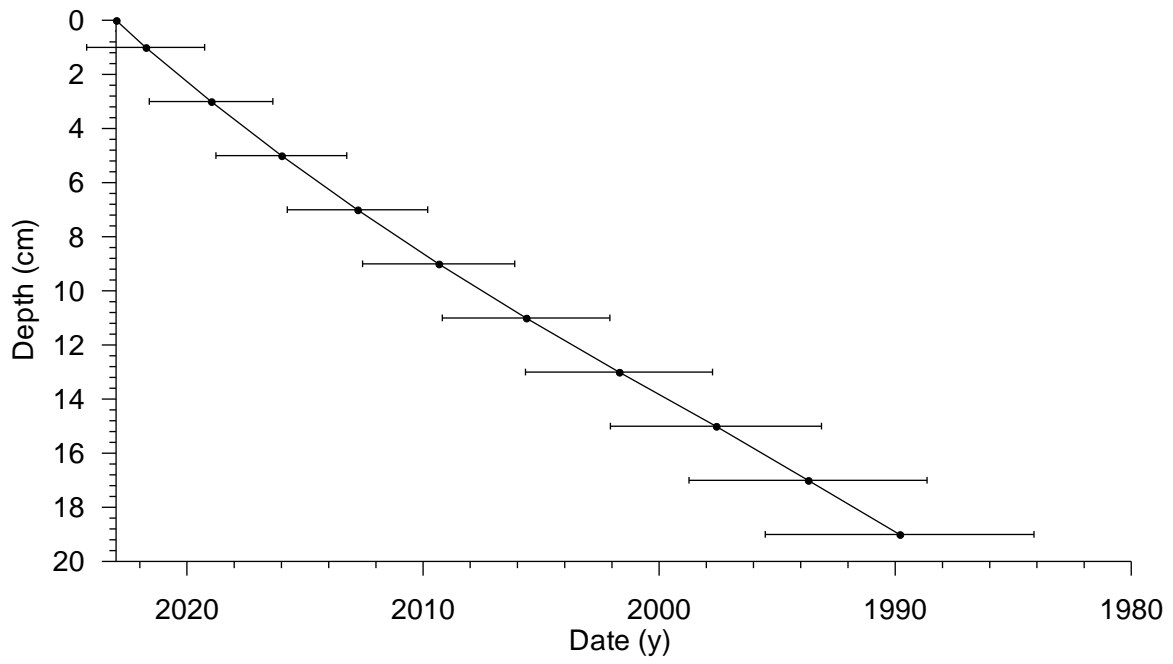
Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			2023		
1.0	1	2	2022	2.04	0.24
3.0	4	3	2019	2.10	0.25
5.0	7	3	2016	2.51	0.33
7.0	10	3	2013	2.78	0.41
9.0	14	3	2009	2.78	0.37
11.0	17	4	2006	2.57	0.38
13.0	21	4	2002	2.33	0.37
15.0	25	4	1998	2.26	0.41
17.0	29	5	1994	2.39	0.53
19.0	33	6	1990	2.53	0.51



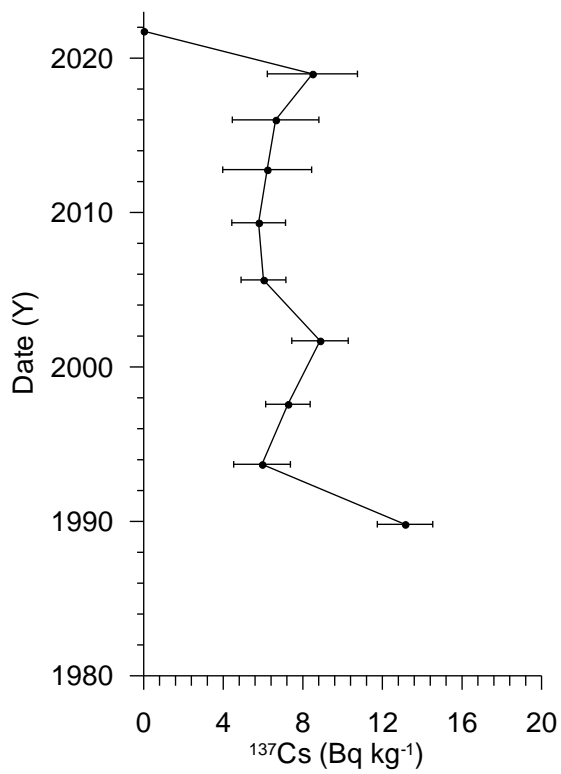
**Fig 9.** Radiometric data



**Fig 2.** Regression of unsupported <sup>210</sup>Pb vs accumulated dry density.



**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 4.**  $^{137}\text{Cs}$  profile as dated by  $^{210}\text{Pb}$ -dating

# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, March 21st, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen**  
**Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)**  
**University of Copenhagen**  
**Oester Voldgade 10**  
**1350 Copenhagen K**  
**e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)**  
**phone +45 35 32 25 03**  
**fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302016b**



## **Dating of core P2302016b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma-spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around  $225 \text{ Bq kg}^{-1}$  with a tendency for exponential with depth but little gradient down-core.

The calculated flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is  $823 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  which is about six to seven times higher than the expected flux (based on data shown in Appleby, 2001). This indicates that the site is subject to intense sediment focusing.

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and showed no distinct peaks.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2. The result is shown in table 2 and fig 3 and 4.

The chronology given in table 2 is only valid if bioturbation and other sediment mixing is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated. The exponential decrease in the content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  gives confidence in the result but the chronology cannot be verified by means of the  $^{137}\text{Cs}$  data as the core only reaches back to late 1980's. The  $^{210}\text{Pb}$ -based chronology is therefore considered to be reliable but it is not verified by independent data.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

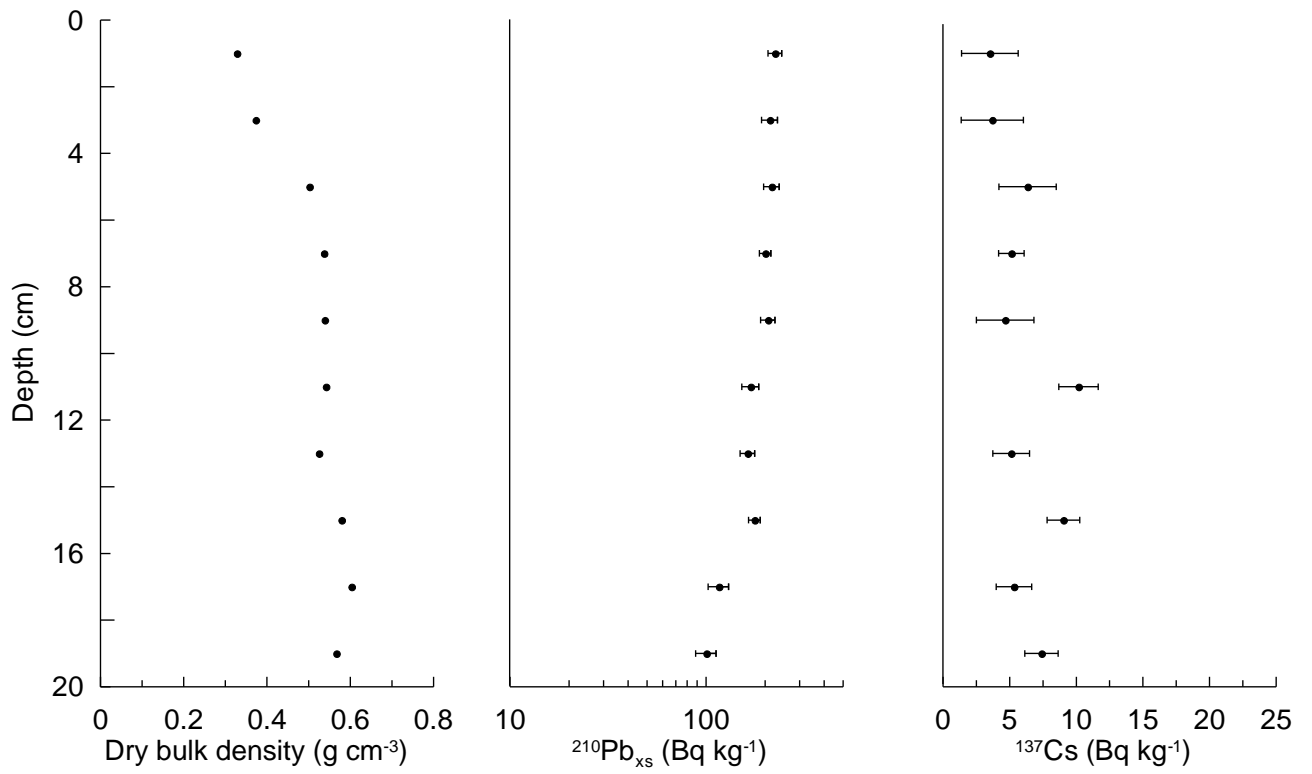
Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

Table 1. Radiometric data, P2302016b

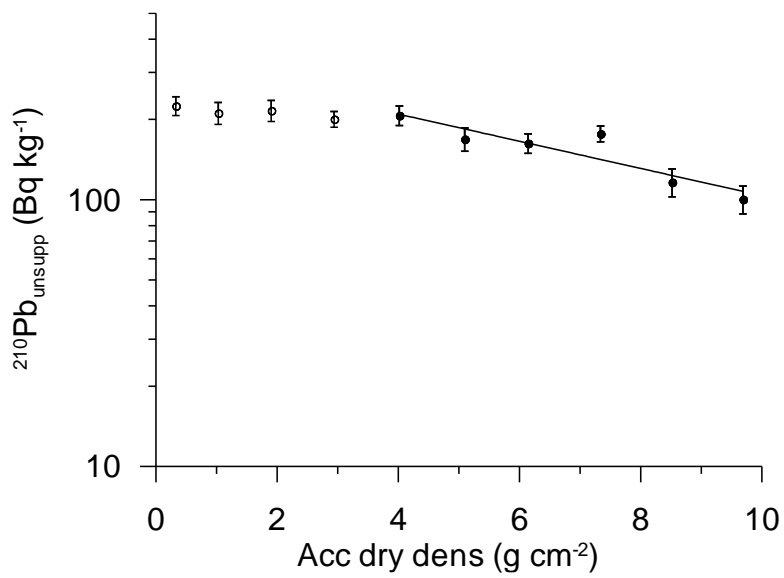
Depth	Pb-210 <sub>tot</sub>	error Pb-210 <sub>tot</sub>	Pb-210 <sub>sup</sub>	error pb-210 <sub>sup</sub>	Pb-210 <sub>unsup</sub>	error pb-210 <sub>unsup</sub>	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>
1.0	246	18	21	0	225	18	4	2
3.0	229	17	18	3	212	20	4	2
5.0	237	18	21	2	216	20	6	2
7.0	220	12	19	2	201	14	5	1
9.0	229	17	22	0	207	17	5	2
11.0	190	13	21	4	169	17	10	1
13.0	181	12	18	2	163	14	5	1
15.0	198	12	21	0	177	12	9	1
17.0	136	10	20	4	116	14	5	1
19.0	123	9	23	3	100	12	7	1

Table 2, chronology core, P2302016b

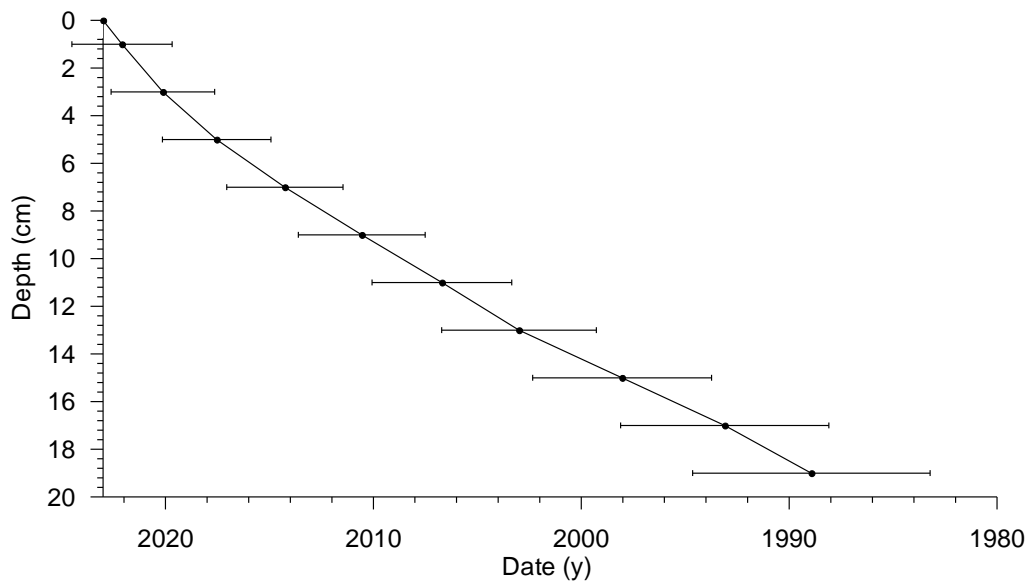
Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			2023		
1.0	1	2	2022	3.61	0.39
3.0	3	2	2020	3.56	0.43
5.0	5	3	2018	3.38	0.41
7.0	9	3	2014	3.17	0.36
9.0	12	3	2011	2.90	0.38
11.0	16	3	2007	2.80	0.42
13.0	20	4	2003	2.82	0.43
15.0	25	4	1998	2.41	0.40
17.0	30	5	1993	2.39	0.50
19.0	34	6	1989	2.81	0.56



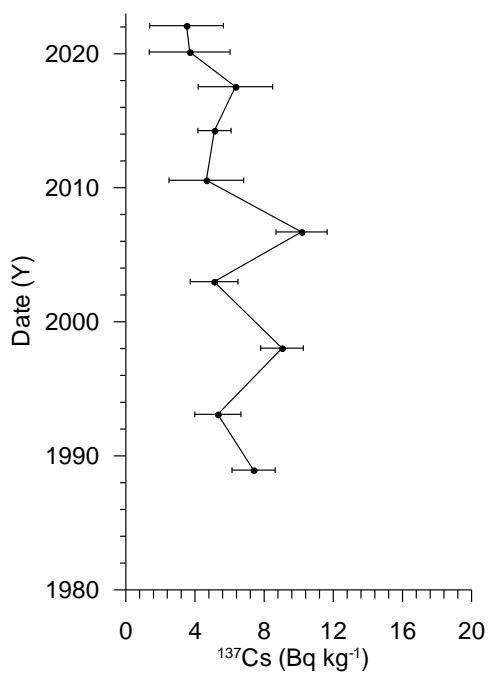
**Fig 10.** Radiometric data



**Fig 2.** Regression of unsupported <sup>210</sup>Pb vs accumulated dry density.



**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 4.**  $^{137}\text{Cs}$  profile as dated by  $^{210}\text{Pb}$ -dating

# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, March 21st, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen**  
**Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)**  
**University of Copenhagen**  
**Oester Voldgade 10**  
**1350 Copenhagen K**  
**e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)**  
**phone +45 35 32 25 03**  
**fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302021b**

## **Dating of core P2302021b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around  $130 \text{ Bq kg}^{-1}$  with a tendency for exponential with depth.

The calculated flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is  $223 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  which is in line with the expected flux (based on data shown in Appleby, 2001).

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and showed no distinct peaks.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2. The result is shown in table 2 and fig 3 and 4.

The chronology given in table 2 is only valid if bioturbation and other sediment mixing is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated. The exponential decrease in the content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  gives confidence in the result but  $^{137}\text{Cs}$  is observed in layers dated to before the initial release of this artificial isotope into nature in the 1950's.

Some mixing is therefore indicated and the chronology must be considered to be only indicative.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

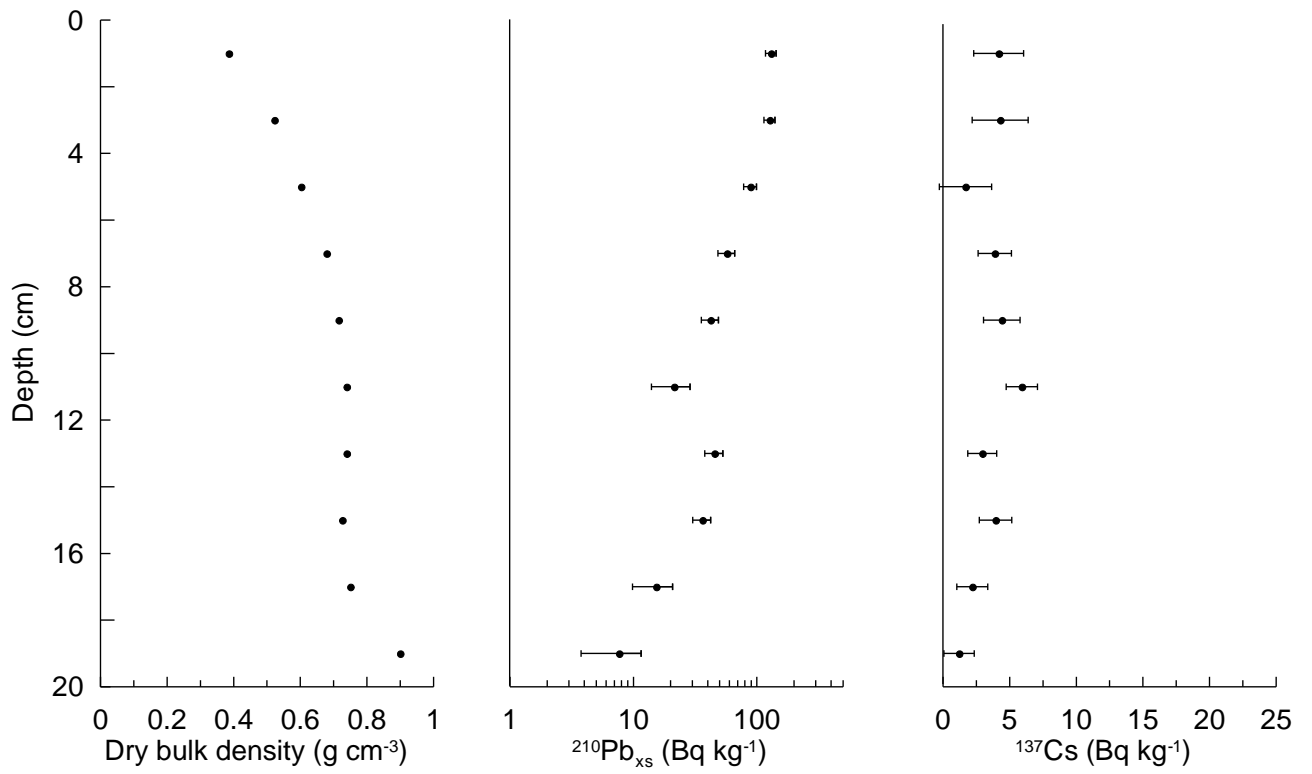
Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

Table 1. Radiometric data, P2302021b

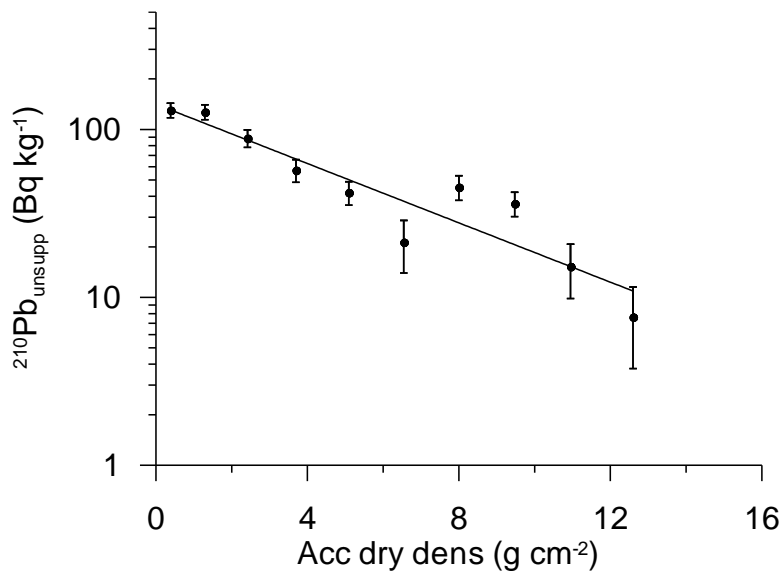
Depth	Pb-210 <sub>tot</sub>	error Pb-210 <sub>tot</sub>	Pb-210 <sub>sup</sub>	error pb-210 <sub>sup</sub>	Pb-210 <sub>unsup</sub>	error pb-210 <sub>unsup</sub>	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1
1.0	152	12	21	1	130	13	4	2
3.0	152	12	25	1	127	13	4	2
5.0	115	10	26	1	89	11	2	2
7.0	81	6	24	3	57	9	4	1
9.0	70	6	27	1	42	7	4	1
11.0	49	4	28	3	21	7	6	1
13.0	73	6	28	2	45	8	3	1
15.0	65	5	29	1	36	6	4	1
17.0	43	4	27	2	15	5	2	1
19.0	34	3	26	1	8	4	1	1

Table 2, chronology core, P2302021b

Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m-2 y-1)	(kg m-2 y-1)
			2023		
1.0	2	2	2021	1.65	0.17
3.0	9	2	2014	1.47	0.16
5.0	17	2	2006	1.40	0.18
7.0	24	3	1999	1.62	0.26
9.0	32	3	1991	1.87	0.33
11.0	38	3	1985	2.37	0.77
13.0	46	4	1977	1.81	0.33
15.0	60	5	1963	1.06	0.22
17.0	74	6	1949	1.09	0.40
19.0	83	7	1940	1.70	0.40

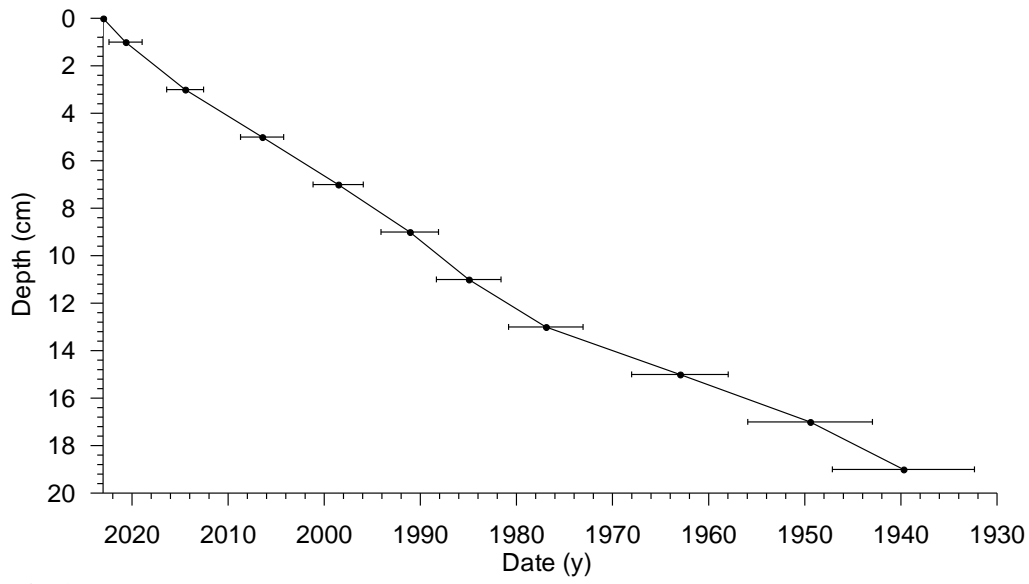


**Fig 11.** Radiometric data

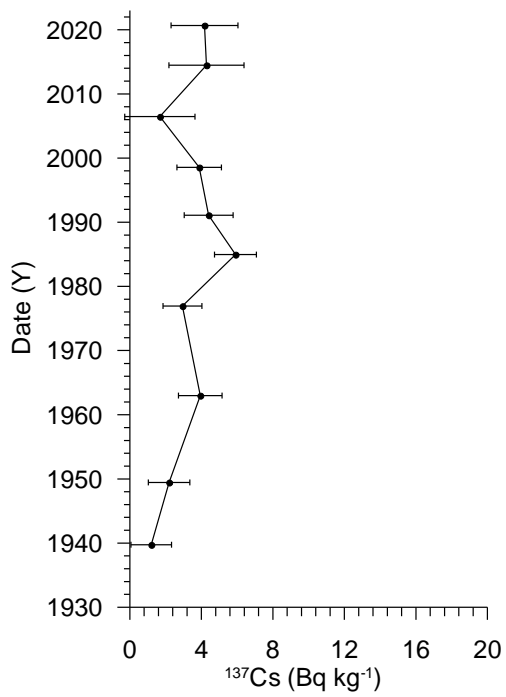


**Fig 2.** Regression of unsupported <sup>210</sup>Pb vs accumulated dry density.





**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 4.** <sup>137</sup>Cs profile as dated by <sup>210</sup>Pb-dating

# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, March 21st, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen  
Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)  
University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10  
1350 Copenhagen K  
e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)  
phone +45 35 32 25 03  
fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302022b**

## **Dating of core P2302022b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma-spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around  $160 \text{ Bq kg}^{-1}$  with a clear tendency for exponential with depth but only down to a depth of about 12 cm. The calculated flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is  $218 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  which is in line with the expected flux (based on data shown in Appleby, 2001).

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and showed no distinct peaks.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2. The result is shown in table 2 and fig 3 and 4.

The chronology given in table 2 is only valid if bioturbation and other sediment mixing is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated. The exponential decrease in the content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  gives confidence in the result and the  $^{137}\text{Cs}$  data confirms this chronology although the activities are very low. Consequently, the chronology is considered to be reliable down to a depth of 12 cm and indicative below that level.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

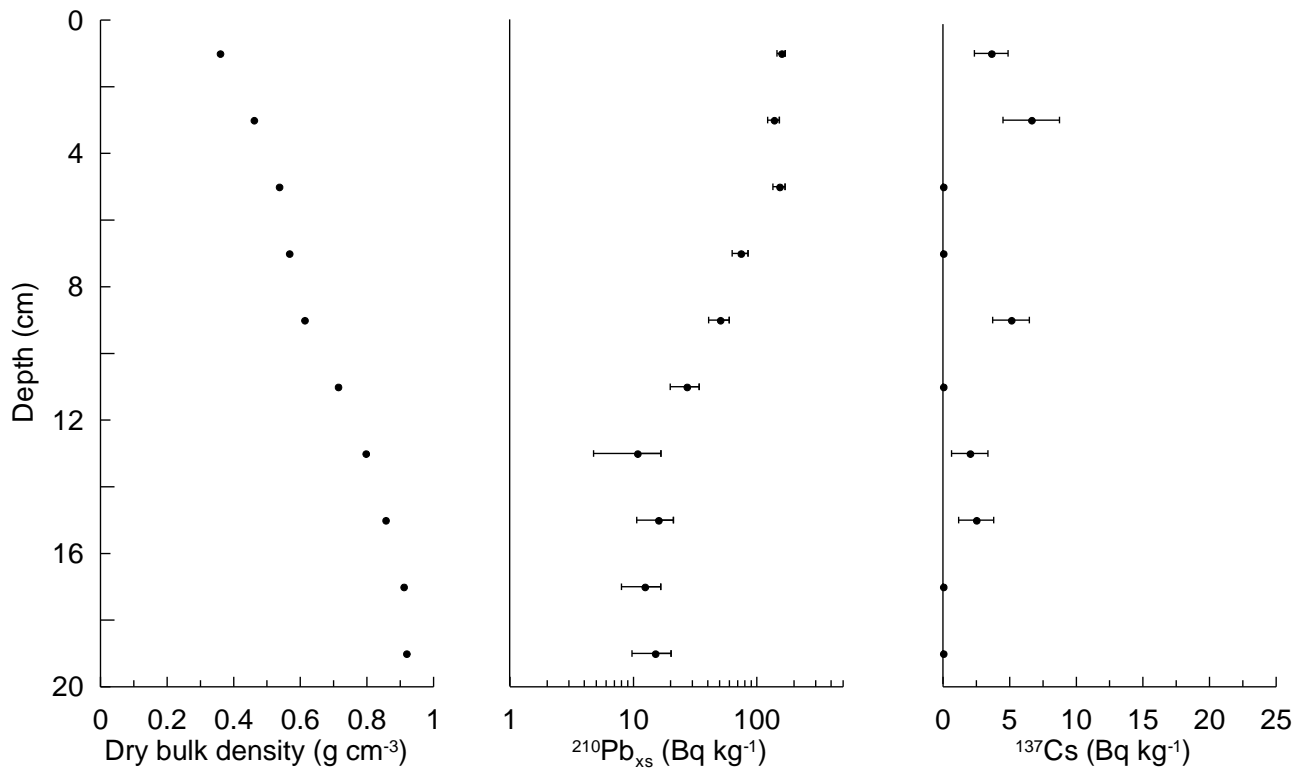
Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

Table 1. Radiometric data, P2302022b

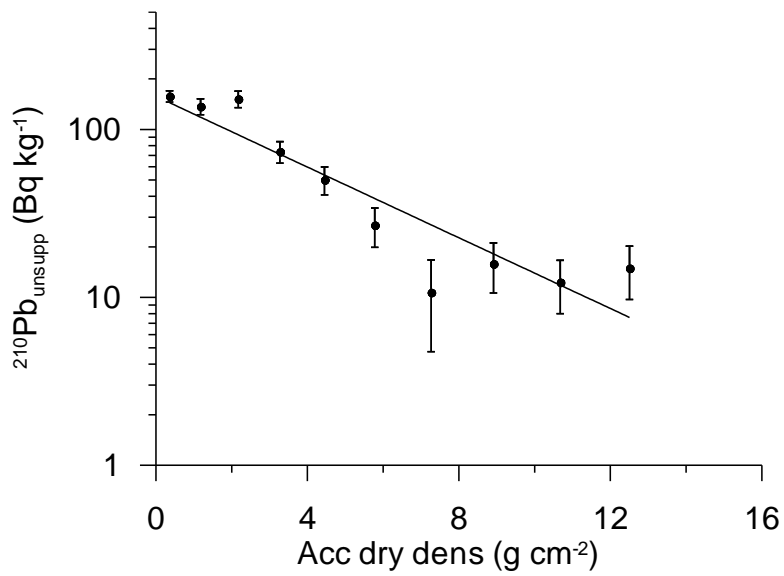
Depth	Pb-210tot	error Pb-210 tot	Pb-210 sup	error pb-210 sup	Pb-210 un-sup	error pb-210 un-sup	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1	Bq kg-1
1.0	183	11	25	1	158	12	4	1
3.0	158	13	21	2	137	15	7	2
5.0	176	14	24	3	152	17	0	0
7.0	98	8	24	2	74	11	0	0
9.0	76	6	26	3	50	10	5	1
11.0	56	5	29	2	27	7	0	0
13.0	39	4	28	2	11	6	2	1
15.0	41	4	25	1	16	5	2	1
17.0	40	4	28	1	12	4	0	0
19.0	46	4	31	1	15	5	0	0

Table 2, chronology core, P2302022b

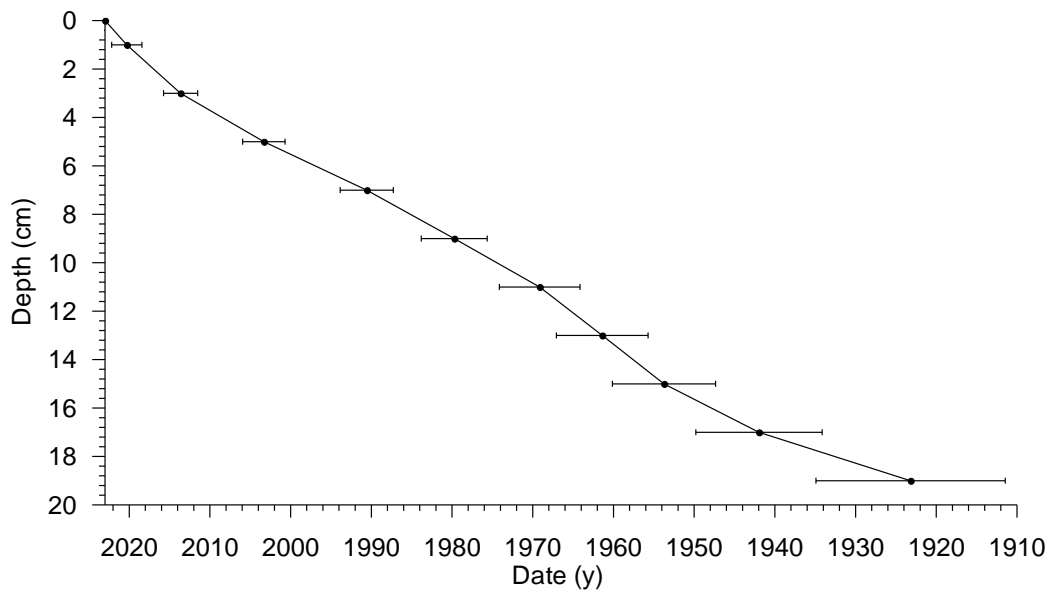
Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m-2 y-1)	(kg m-2 y-1)
			2023		
1.0	3	2	2020	1.33	0.12
3.0	9	2	2014	1.23	0.14
5.0	20	3	2003	0.96	0.12
7.0	32	3	1991	0.86	0.14
9.0	43	4	1980	1.09	0.23
11.0	54	5	1969	1.25	0.36
13.0	62	6	1961	1.92	1.01
15.0	69	6	1954	2.15	0.73
17.0	81	8	1942	1.50	0.54
19.0	100	12	1923	0.97	0.36



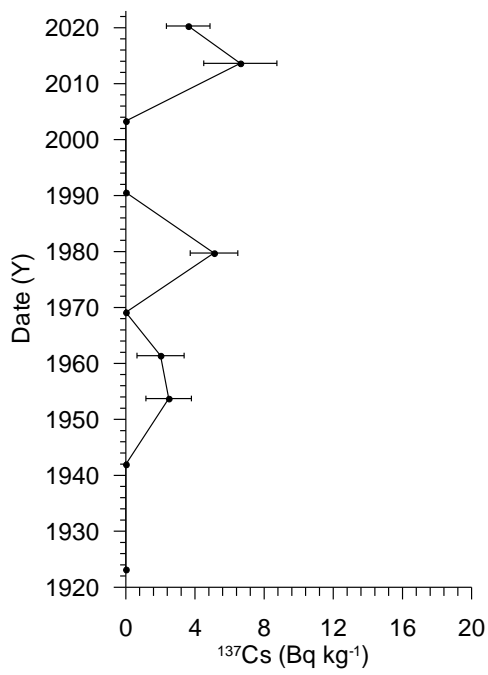
**Fig 12.** Radiometric data



**Fig 2.** Regression of unsupported <sup>210</sup>Pb vs accumulated dry density.



**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 4.** <sup>137</sup>Cs profile as dated by <sup>210</sup>Pb-dating

# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, March 21st, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen**  
**Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)**  
**University of Copenhagen**  
**Oester Voldgade 10**  
**1350 Copenhagen K**  
**e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)**  
**phone +45 35 32 25 03**  
**fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302023b**

## **Dating of core P2302023b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma-spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around  $190 \text{ Bq kg}^{-1}$  with a clear tendency for exponential with depth (fig 1).

The calculated flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is  $294 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  which is about twice the expected flux (based on data shown in Appleby, 2001).

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and showed no distinct peaks but a slight increase downcore.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2. The result is shown in table 2 and fig 3 and 4.

The chronology given in table 2 is only valid if bioturbation and other sediment mixing is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated. The exponential decrease in the content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  gives confidence in the result and the increase in  $^{137}\text{Cs}$  down-core is in line with the calculated chronology. Consequently, the chronology is considered to be reliable.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

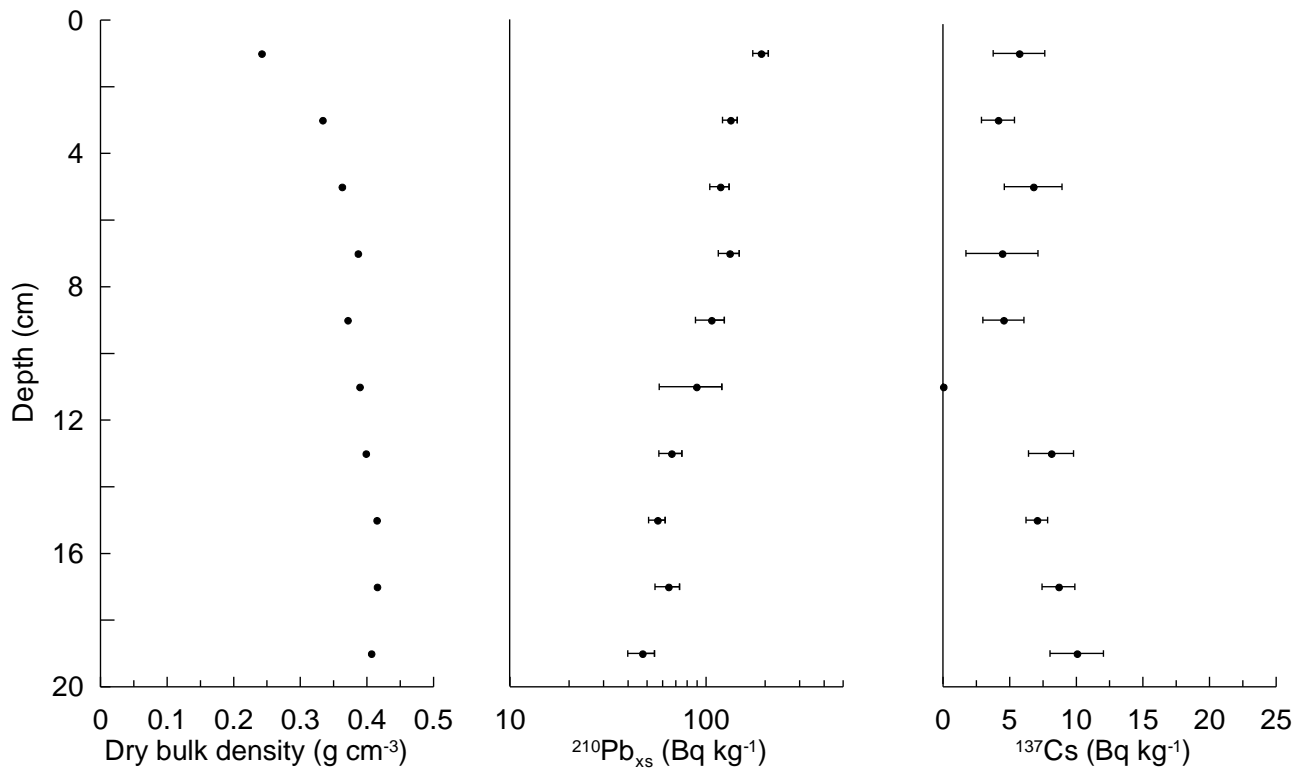


Table 1. Radiometric data, P2302023b

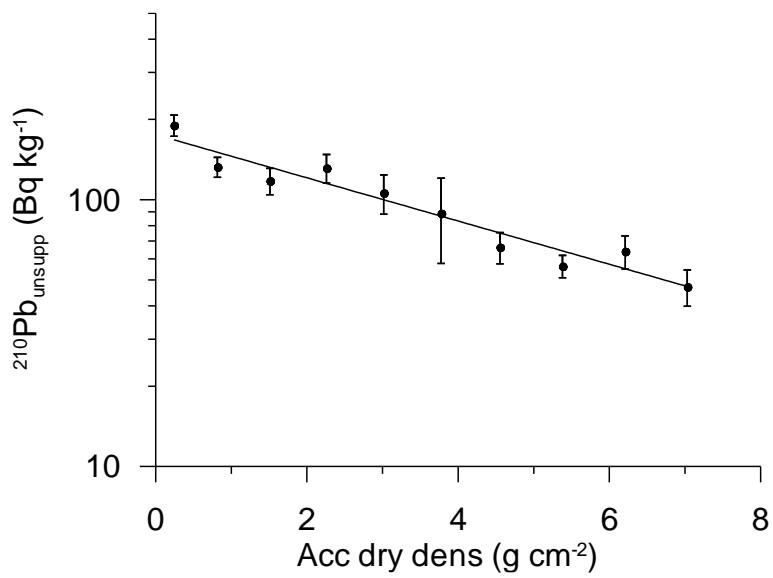
Depth	Pb-210 <sub>tot</sub>	error Pb-210 <sub>tot</sub>	Pb-210 <sub>sup</sub>	error pb-210 <sub>sup</sub>	Pb-210 <sub>unsup</sub>	error pb-210 <sub>unsup</sub>	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>
1.0	225	15	35	2	190	17	6	2
3.0	165	10	32	1	133	11	4	1
5.0	151	12	33	1	118	13	7	2
7.0	166	14	35	3	132	16	4	3
9.0	132	10	26	8	106	18	5	2
11.0	121	9	32	22	89	31	0	0
13.0	95	8	29	1	66	9	8	2
15.0	85	5	28	0	56	5	7	1
17.0	90	7	25	2	64	9	9	1
19.0	78	6	30	1	47	7	10	2

Table 2, chronology core, P2302023b

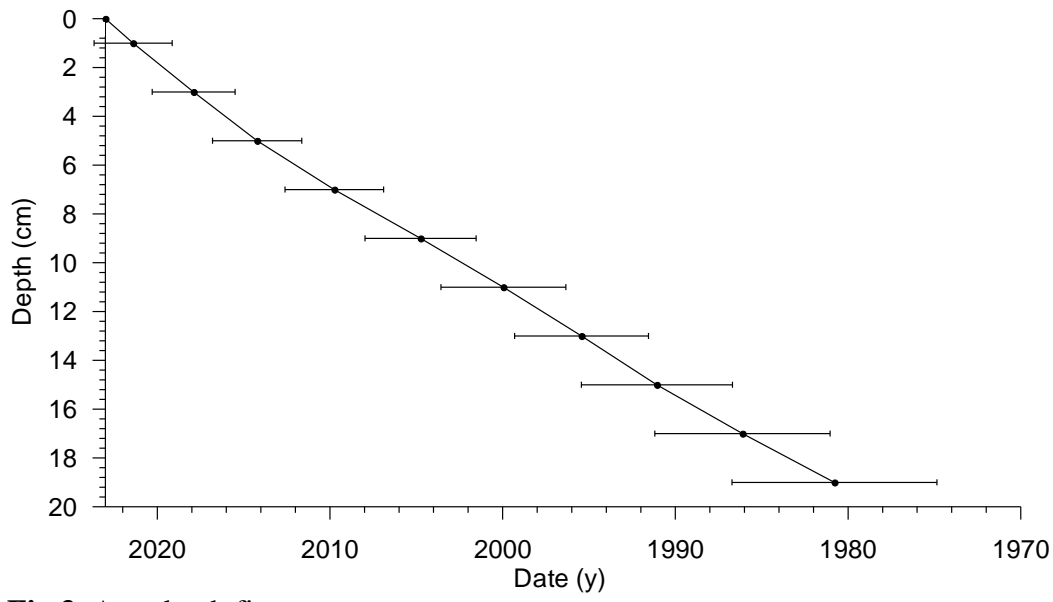
Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			2023		
1.0	2	2	2021	1.51	0.17
3.0	5	2	2018	1.64	0.18
5.0	9	3	2014	1.89	0.26
7.0	13	3	2010	1.67	0.25
9.0	18	3	2005	1.51	0.29
11.0	23	4	2000	1.58	0.56
13.0	28	4	1995	1.72	0.31
15.0	32	4	1991	1.90	0.33
17.0	37	5	1986	1.67	0.36
19.0	42	6	1981	1.54	0.31



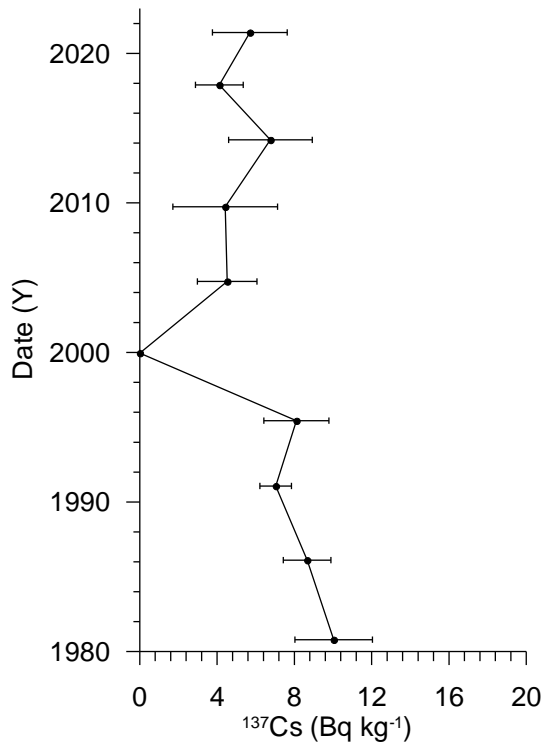
**Fig 13.** Radiometric data



**Fig 2.** Regression of unsupported <sup>210</sup>Pb vs accumulated dry density.



**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 4.** <sup>137</sup>Cs profile as dated by <sup>210</sup>Pb-dating

# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, March 21st, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen**  
**Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)**  
**University of Copenhagen**  
**Oester Voldgade 10**  
**1350 Copenhagen K**  
**e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)**  
**phone +45 35 32 25 03**  
**fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302030b**

## **Dating of core P2302030b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around 200 Bq kg<sup>-1</sup> with a clear tendency for exponential with depth (fig 1).

The calculated flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is 284 Bq m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup> which is about twice the expected flux (based on data shown in Appleby, 2001).

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and showed no distinct peaks but a slight decrease downcore.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2. The result is shown in table 2 and fig 3 and 4.

The chronology given in table 2 is only valid if bioturbation and other sediment mixing is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated. The exponential decrease in the content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  gives confidence in the result but the fairly uniform content of  $^{137}\text{Cs}$  indicate that some mixing is probably taking place at the site.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

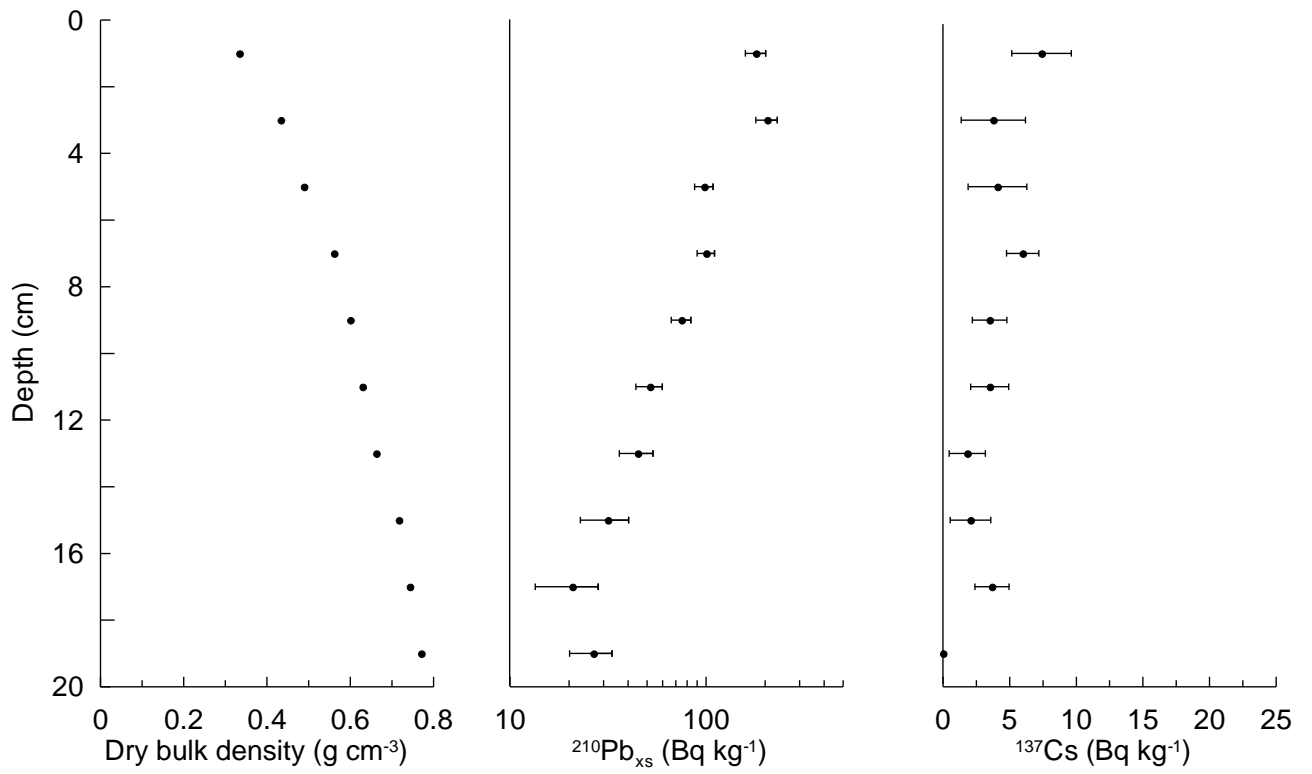
Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

Table 1. Radiometric data, P2302030b

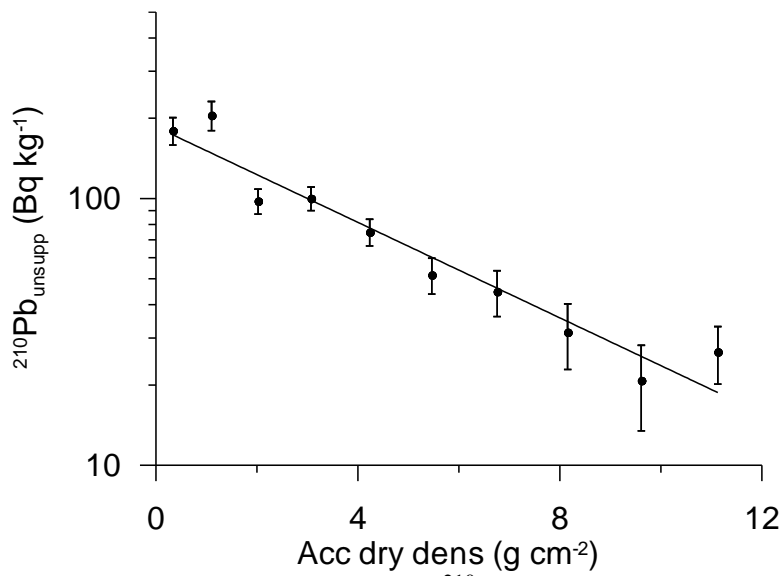
Depth	Pb-210 <sub>tot</sub>	error Pb-210 <sub>tot</sub>	Pb-210 <sub>sup</sub>	error pb-210 <sub>sup</sub>	Pb-210 <sub>unsup</sub>	error pb-210 <sub>unsup</sub>	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>
1.0	203	16	23	5	180	21	7	2
3.0	236	18	31	8	205	26	4	2
5.0	125	10	28	0	98	11	4	2
7.0	125	9	25	1	100	10	6	1
9.0	100	8	25	1	75	9	3	1
11.0	80	7	28	1	52	8	4	1
13.0	73	6	28	3	45	9	2	1
15.0	60	5	29	3	32	9	2	2
17.0	52	5	31	3	21	7	4	1
19.0	59	5	32	2	27	6	0	0

Table 2, chronology core, P2302030b

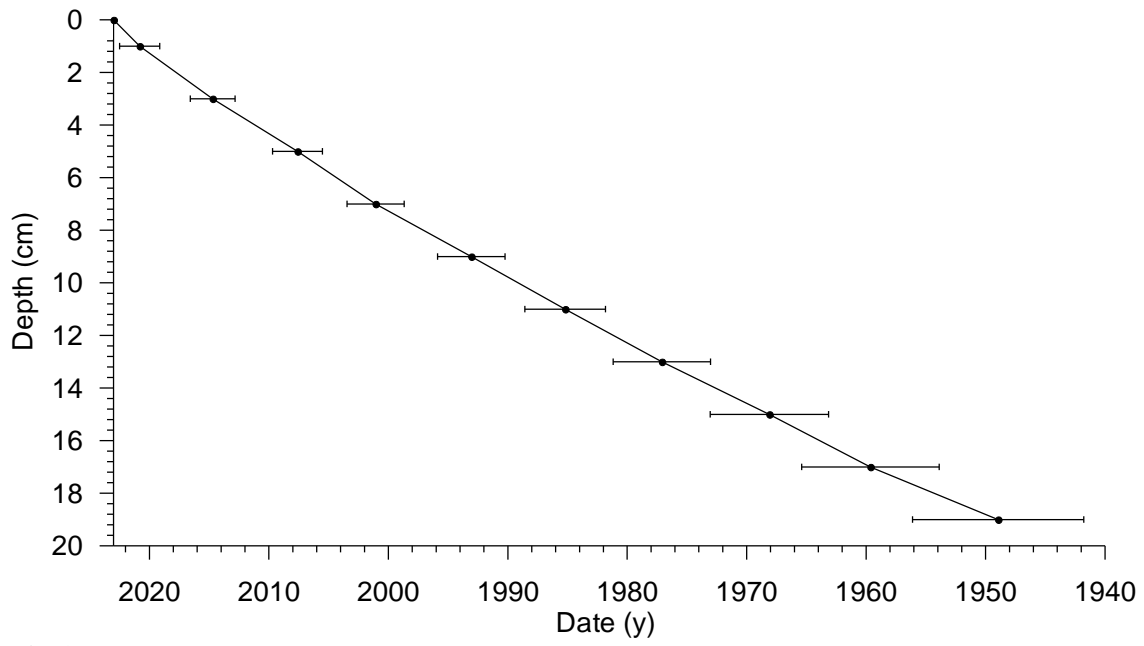
Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			2023		
1.0	2	2	2021	1.53	0.18
3.0	8	2	2015	1.25	0.16
5.0	15	2	2008	1.30	0.15
7.0	22	2	2001	1.61	0.19
9.0	30	3	1993	1.45	0.20
11.0	38	3	1985	1.56	0.27
13.0	46	4	1977	1.60	0.35
15.0	55	5	1968	1.55	0.45
17.0	63	6	1960	1.73	0.61
19.0	74	7	1949	1.42	0.32



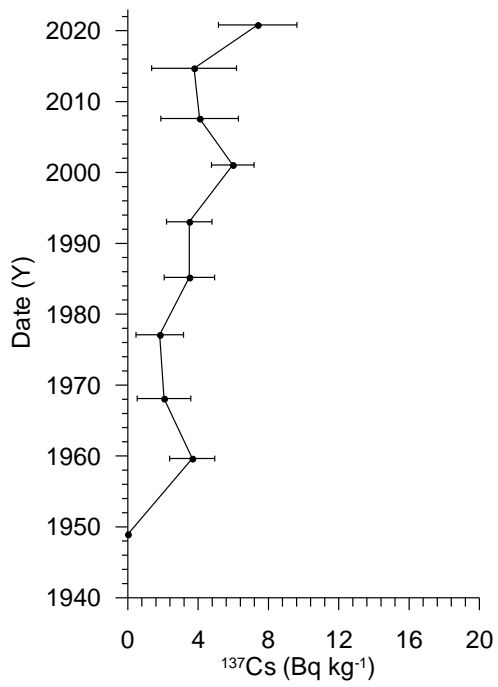
**Fig 14.** Radiometric data



**Fig 2.** Regression of unsupported <sup>210</sup>Pb vs accumulated dry density.



**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 4.** <sup>137</sup>Cs profile as dated by <sup>210</sup>Pb-dating



# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, April 23rd, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen**  
**Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)**  
**University of Copenhagen**  
**Oester Voldgade 10**  
**1350 Copenhagen K**  
**e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)**  
**phone +45 35 32 25 03**  
**fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302039b**

## **Dating of core P2302039b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma-spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around 270 Bq kg<sup>-1</sup> with a tendency for exponential with depth in the upper part of the core but fairly uniform content below 10 cm depth (fig 1). The constant content below 10 cm is not consistent with uniform deposition and may indicate that some mass movement has taken place at the site. It is not possible to calculate the flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$ .

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and fairly uniform down-core.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2 and 2b. The result is shown in table 2 and 2b and fig 3 and 4.

The chronology given in table 2 and 2b is only valid if bioturbation and other sediment mixing (e.g. mass movements) is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated.

The uniform content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  below 10 cm core depth indicates that severe mixing or mass movement has taken place at the site and the chronology is therefore only indicative.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

Table 1. Radiometric data, P2302039b

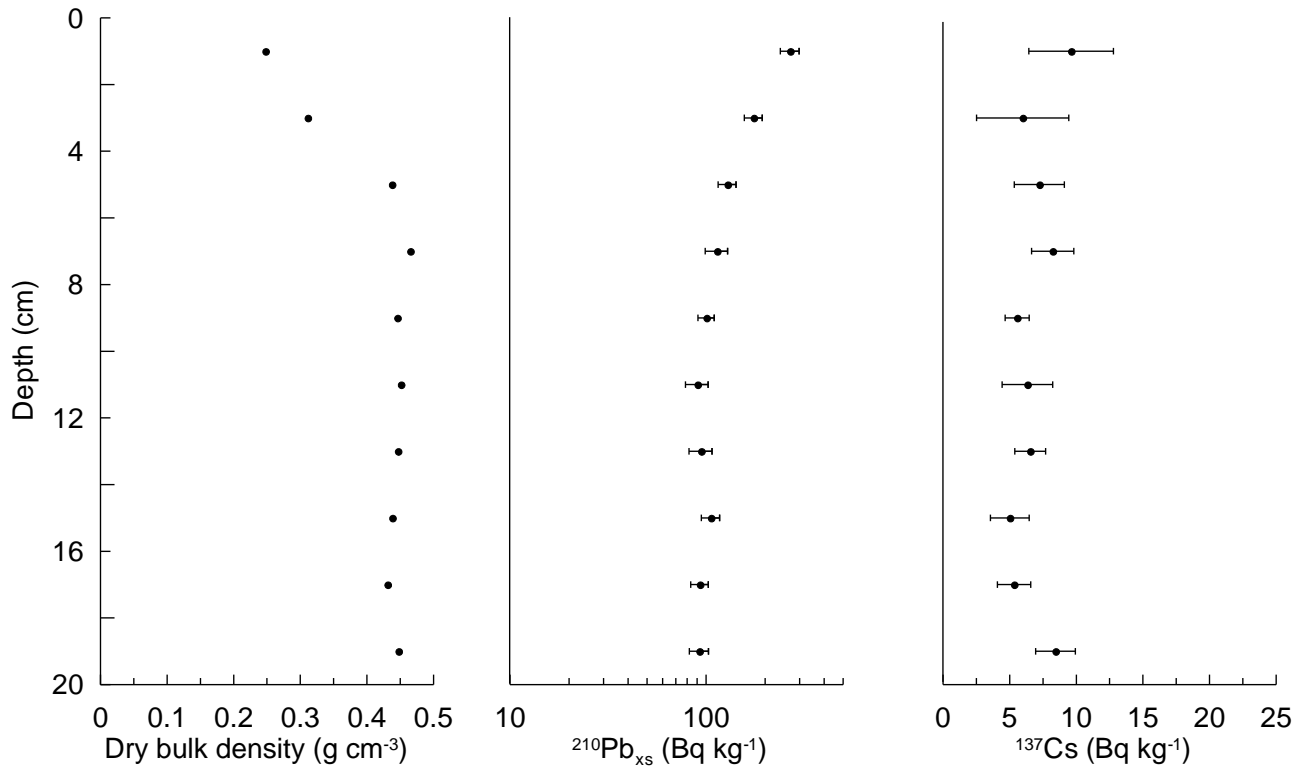
Depth	Pb-210 <sub>tot</sub>	error Pb-210 <sub>tot</sub>	Pb-210 <sub>sup</sub>	error pb-210 <sub>sup</sub>	Pb-210 <sub>unsub</sub>	error pb-210 <sub>unsub</sub>	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>
1.0	297	23	28	6	269	30	10	3
3.0	195	17	20	1	175	18	6	3
5.0	153	12	24	1	129	14	7	2
7.0	130	11	16	4	114	15	8	2
9.0	121	8	20	1	100	10	6	1
11.0	109	10	19	2	90	12	6	2
13.0	115	9	20	4	94	13	7	1
15.0	129	10	23	1	106	11	5	1
17.0	115	9	22	1	93	10	5	1
19.0	116	9	24	1	92	10	8	1

Table 2, chronology core, P2302039b

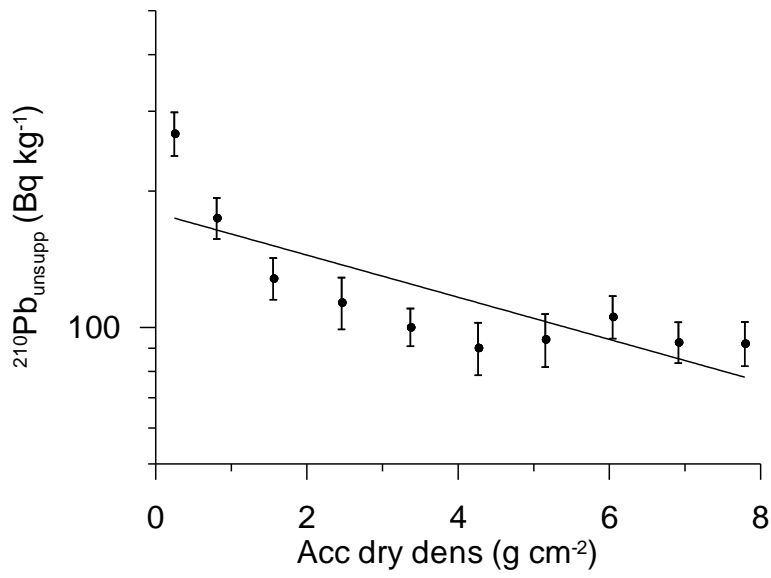
Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			2023		
1.0	1	3	2022	1.89	0.27
3.0	4	3	2019	2.15	0.31
5.0	6	3	2017	2.90	0.43
7.0	9	4	2014	3.34	0.58
9.0	12	4	2011	3.48	0.55
11.0	14	4	2009	3.61	0.68
13.0	17	4	2006	3.45	0.68
15.0	20	5	2003	2.91	0.56
17.0	23	5	2000	2.66	0.55
19.0	27	6	1996	2.57	0.52

Table 2b, Alternative chronology core, P2302039b

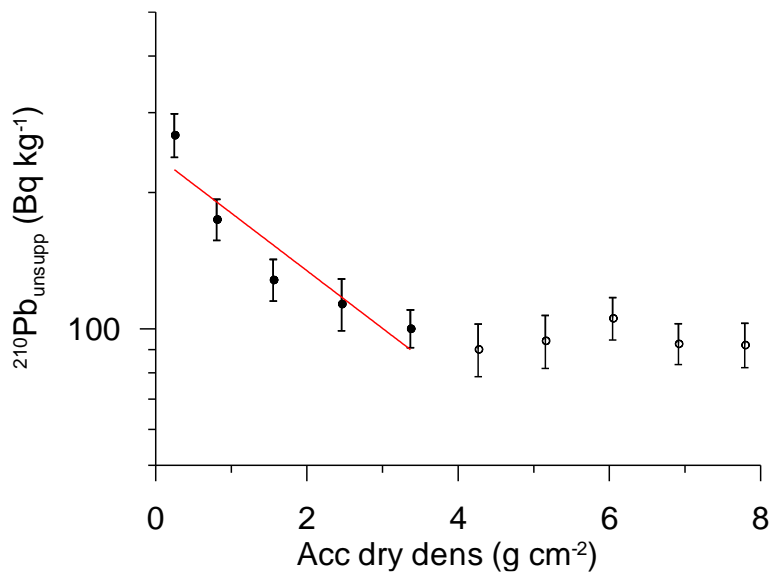
Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			2023		
1.0	3	3	2020	0.91	0.12
3.0	9	3	2014	0.97	0.14
5.0	15	4	2008	1.17	0.18
7.0	23	4	2000	1.17	0.23
9.0	31	6	1992	1.03	0.21



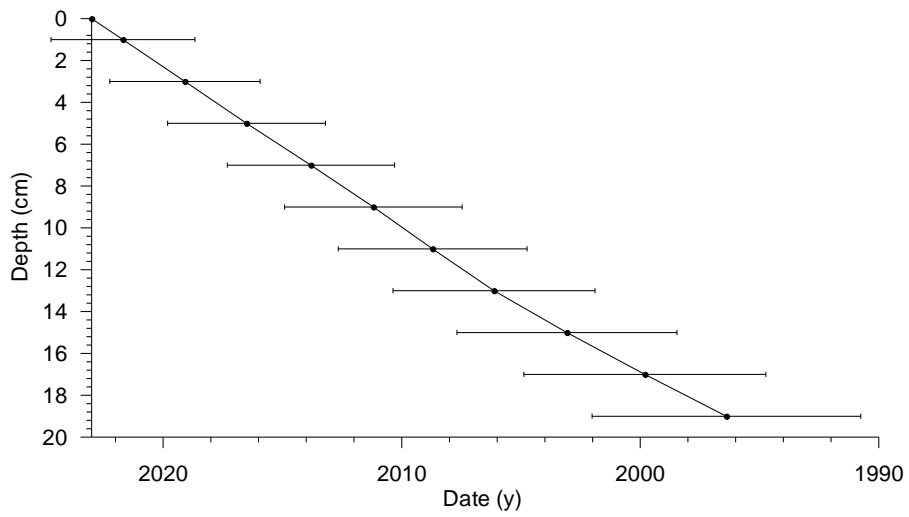
**Fig 15.** Radiometric data



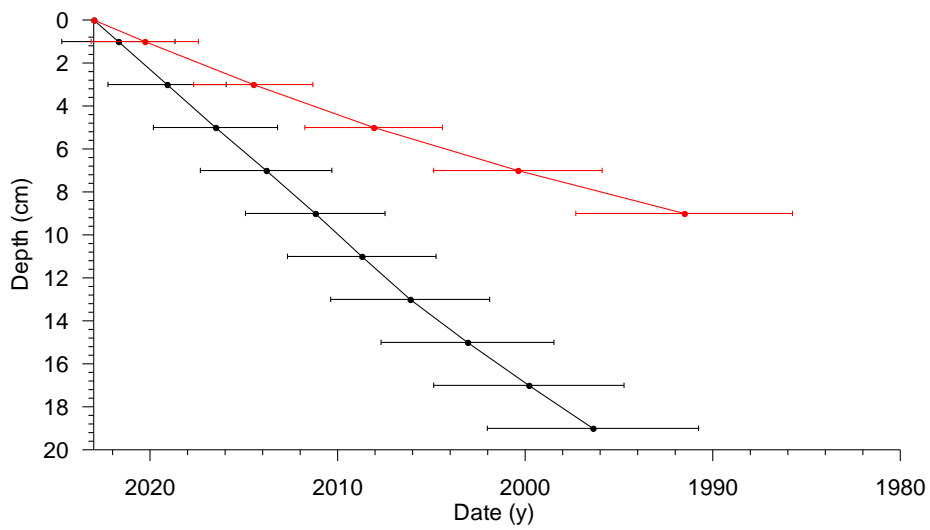
**Fig 2.** Regression of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  vs accumulated dry density.



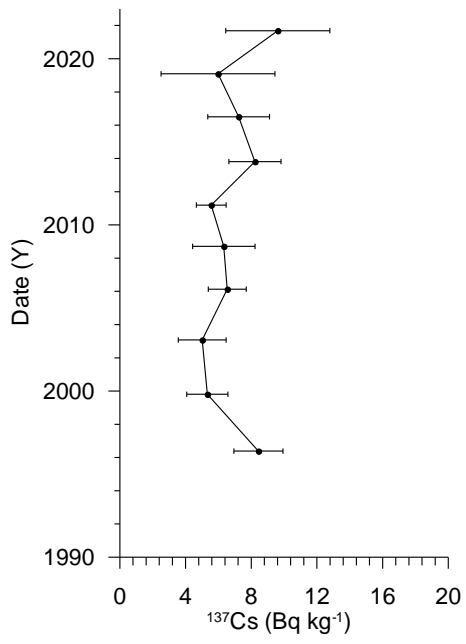
**Fig 2b.** Alternative Regression of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  vs accumulated dry density



**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 3b.** Age-depth figure with alternative chronology shown in red



**Fig 4.**  $^{137}\text{Cs}$  profile as dated by  $^{210}\text{Pb}$ -dating



# **Gamma Dating Center Copenhagen**

---

**Copenhagen, March 22nd, 2024**

**Thorbjørn J. Andersen**  
**Department of Geosciences and Natural Resource Management (IGN)**  
**University of Copenhagen**  
**Oester Voldgade 10**  
**1350 Copenhagen K**  
**e-mail [tja@ign.ku.dk](mailto:tja@ign.ku.dk)**  
**phone +45 35 32 25 03**  
**fax +45 35 32 25 01**

## **Dating of core P2302040b**

## **Dating of core P2302040b**

### **Methods**

The samples have been analysed for the activity of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  via gamma-spectrometry at the Gamma Dating Center, Institute of Geography, University of Copenhagen. The measurements were carried out on a Canberra ultralow-background Ge-detector.  $^{210}\text{Pb}$  was measured via its gamma-peak at 46,5 keV,  $^{226}\text{Ra}$  via the granddaughter  $^{214}\text{Pb}$  (peaks at 295 and 352 keV) and  $^{137}\text{Cs}$  via its peak at 661 keV.

### **Results**

The core showed surface contents of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  of around  $300 \text{ Bq kg}^{-1}$  with a clear tendency for exponential with depth (fig 1).

The calculated flux of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  is  $575 \text{ Bq m}^{-2} \text{ y}^{-1}$  which is about five times higher than the expected flux (based on data shown in Appleby, 2001). This shows that the site is subject to intense sediment focusing.

The content of the isotope  $^{137}\text{Cs}$  was low and showed no distinct peaks.

CRS-modelling has been applied on the profile using a modified method (Appleby, 2001; Andersen 2017) where the activity below the lower-most sample is calculated on the basis of the regression shown in fig 2. The result is shown in table 2 and fig 3 and 4.

The chronology given in table 2 is only valid if bioturbation and other sediment mixing is negligible. If this is not the case, ages given in table 2 are underestimated and accumulation rates are overestimated. The exponential decrease in the content of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  gives confidence in the result but the almost uniform content of  $^{137}\text{Cs}$  indicates that some mixing is likely taking place.

Thorbjørn J. Andersen  
Professor,  
IGN, University of Copenhagen  
Oester Voldgade 10, 1350 Copenhagen K, Denmark

### **References:**

Andersen, T.J., 2017. Some Practical Considerations Regarding the Application of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Dating to Estuarine Sediments. Applications of Paleoenvironmental Techniques in Estuarine Studies . Developments in Paleoenvironmental Research (DPER), Vol. 20, p 121-140.

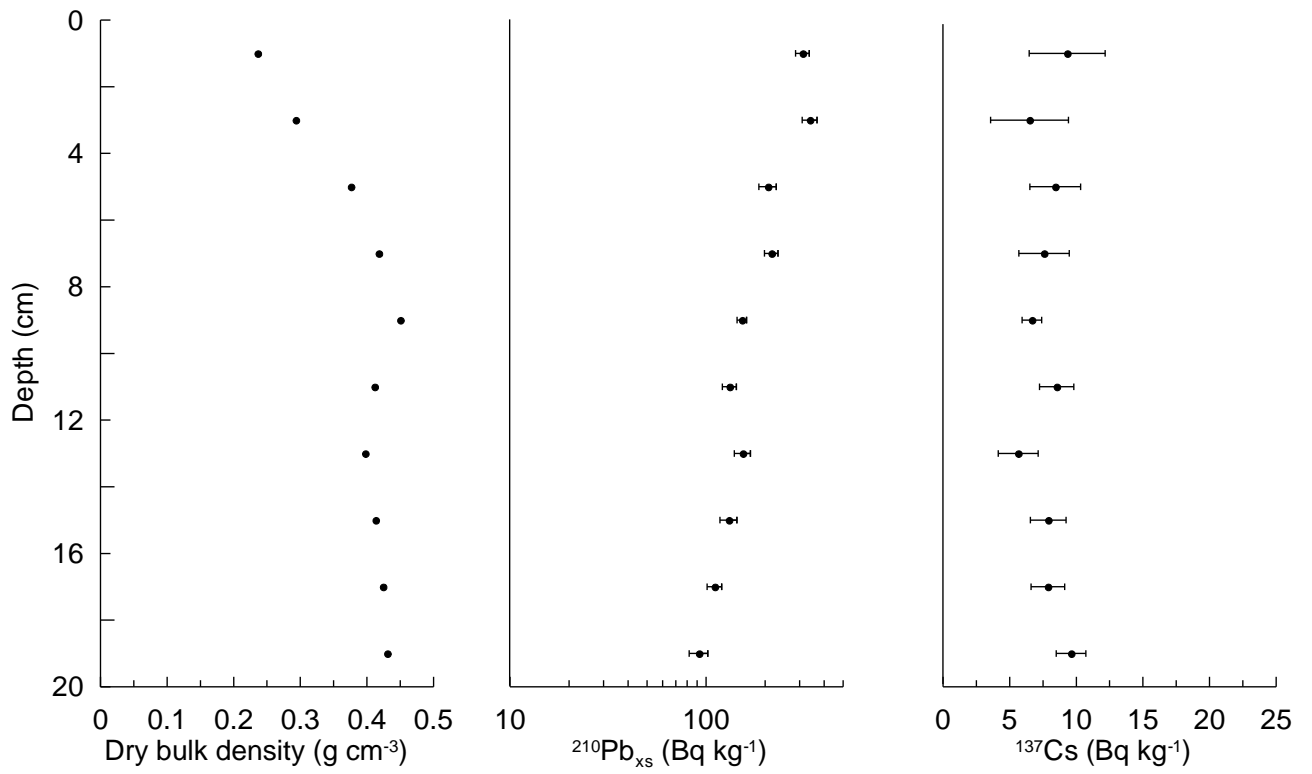
Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last, W.M & Smol, J.P. (eds) Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.

Table 1. Radiometric data, P2302040b

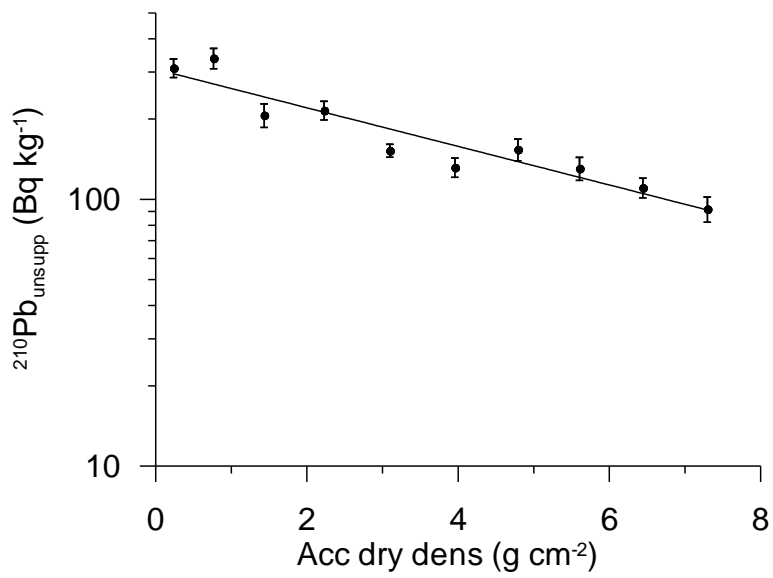
Depth	Pb-210 <sub>tot</sub>	error Pb-210 <sub>tot</sub>	Pb-210 <sub>sup</sub>	error pb-210 <sub>sup</sub>	Pb-210 <sub>unsup</sub>	error pb-210 <sub>unsup</sub>	Cs-137	error Cs-137
cm	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>	Bq kg <sup>-1</sup>
1.0	334	25	23	0	311	25	9	3
3.0	371	28	32	2	338	29	6	3
5.0	233	17	26	4	207	21	8	2
7.0	233	17	18	0	216	17	8	2
9.0	172	9	20	0	152	9	7	1
11.0	154	10	22	0	132	11	9	1
13.0	175	12	21	3	154	14	6	1
15.0	152	10	21	3	131	13	8	1
17.0	133	9	23	0	111	9	8	1
19.0	112	8	20	2	92	10	10	1

Table 2, chronology core, P2302040b

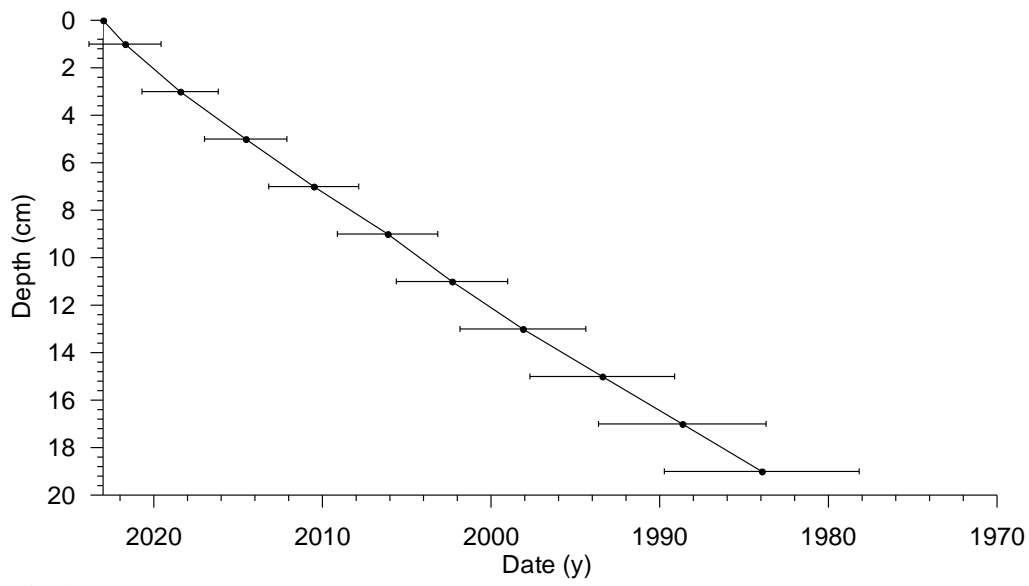
Depth	Age	error age	Date	acc rate	error rate
cm	y	y	y	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )	(kg m <sup>-2</sup> y <sup>-1</sup> )
			2023		
1.0	1	2	2022	1.81	0.18
3.0	5	2	2018	1.62	0.18
5.0	8	2	2015	1.72	0.22
7.0	12	3	2011	1.97	0.23
9.0	17	3	2006	1.98	0.23
11.0	21	3	2002	2.26	0.31
13.0	25	4	1998	1.98	0.31
15.0	30	4	1993	1.73	0.31
17.0	34	5	1989	1.76	0.34
19.0	39	6	1984	1.81	0.36



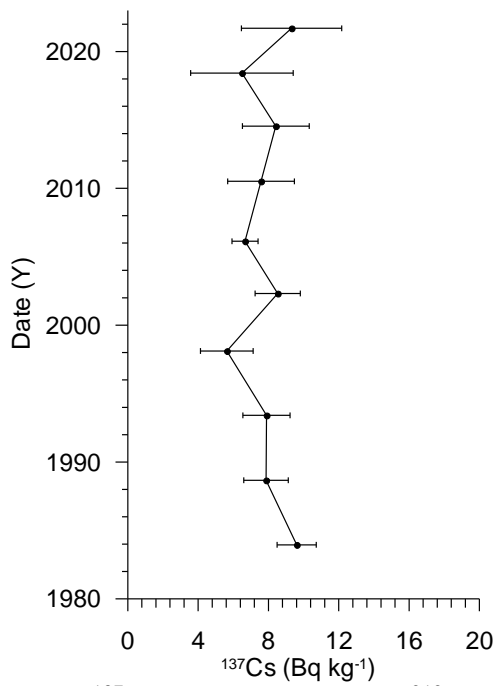
**Fig 16.** Radiometric data



**Fig 2.** Regression of unsupported <sup>210</sup>Pb vs accumulated dry density.



**Fig 3.** Age-depth figure



**Fig 4.**  $^{137}\text{Cs}$  profile as dated by  $^{210}\text{Pb}$ -dating



NORGES  
GEOLOGISKE  
UNDERSØKELSE  
· NGU ·

Norges geologiske undersøkelse  
Postboks 6315, Sluppen  
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse  
Leiv Eirikssons vei 39  
7040 Trondheim

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