



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Rekonstruksjon av resente miljøendringer fra geokjemisk sedimentanalyse i Arnafjordsystemet, Vest-Norge.

Recent environmental change as reconstructed from geochemical sediment analysis in the Arnafjord system, Western Norway.

Anna Elise Kvamme Grønlund (212).

Geologi og Geofare

Fakultet for Ingeniør- og naturvitenskap (FIN)

Veileder: Matthias Paetzel

04.06.2021

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1

Sammendrag

Tre sedimentkjerner fra Arnafjordsystemet i Vest-Norge, nærmere bestemt Arnafjordbassenget, Indrefjorden og Framfjorden, har blitt undersøkt for innvirkninger fra miljøendringer de siste 100 årene.

Tidligere estimerte lineære sedimentasjonsrater over de siste 200 år ble verifisert og bestemt på fem til ti års frekvens ved å utarbeide forholdet mellom årlig nedbør og avsetning av avhengig partikulært materiale, her representert ved det geokjemiske signalet fra sedimentenes koherens. Elementanalyse ved røntgenfluorescens (XRF) på en ITRAX kjerneskaner viste signifikante endringer i elementsammensetningen av sedimentene i de tre fjordbassengene knyttet til (a) marine forhold og marint organisk materiale (Br/Fe, Sr/Fe, Cl/Fe, Ba/Ce), (b) tidlig diagenese (S/Fe) og (c) terrestriske forhold og minerogent materiale (Si/Fe, K/Fe).

Endringene i sedimentenes elementsammensetning ble tolket i henhold til sine respektive kilder, det vil si miljøendringene bestående av (a) Talkgruver med talkmølledrift ved Framfjorden fra 1907 til 1984 (og bare mølledrift fram til 2002) som førte til økt primærproduksjon i fjordene grunnet økt tilførsel av minerogene næringsstoffer, tolket av Br-konsentrasjonene og de marine signalene (Sr, Cl, Ba/Ce) i sedimentene, (b) Vassdragsutbyggingen i 1968 som reduserte ferskvannsavrenning fra land med 75 til 80% og førte til en tilsvarende reduksjon i tilførselen av minerogene næringsstoffer til Framfjorden, tolket av Br-, Si- og K-konsentrasjonene i sedimentene, og (c) Settefiskanlegget på land ved Indrefjorden siden 1986 der sedimentene viser en varierende påvirkning av fjordene relatert til endringer i driften av anlegget, tolket av S- og Br-konsentrasjonene i sedimentene. I tillegg kan sedimentsignalene av Br-, Si- og K-konsentrasjonen tolkes dithen at den kontinuerlig økende nedbørsmengden i området over de siste 100 år har maskert noe av den negative effekten som vassdragsutbyggingen har hatt på miljøet i Framfjorden. Variasjonene i svovelkonsentrasjonen tillater antakelsen at alle tre fjordområder har vært oksiske over de siste 100 årene, og minst oksisk i Indrefjorden.

De sedimentære endringene over tid er videre tolket i rom i henhold til spredning av miljøsignalene gjennom vannets sirkulasjonsmønster i Arnafjordsystemet.

Abstract

Three sediment cores from the Arnafjord system in Western Norway, more specifically the Arnafjord Basin, the Indrefjord and the Framfjord, have been investigated for impacts from environmental changes over the past 100 years.

Previously estimated linear sedimentation rates over the last 200 years were verified and determined at a frequency of five to ten years by calculating the relationship between annual precipitation and deposition of dependent particulate matter, here represented by the geochemical signal from sediment coherence. Elemental analysis by X-ray fluorescence (XRF) on an ITRAX core scanner showed significant changes in the elemental composition of the sediments in the three fjord basins related to (a) marine conditions and marine organic material (Br/Fe, Sr/Fe, Cl/Fe, Ba/Ce), (b) early diagenesis (S/Fe) and (c) terrestrial conditions and minerogenic material (Si/Fe, K/Fe).

The changes in the element composition of the sediments were interpreted according to their respective sources, i.e. the environmental changes consisting of (a) Talc mines with talc mill operation at Framfjorden from 1907 to 1984 (and only talc mill operation until 2002) which led to increased primary production in the fjords due to increased supply of minerogenic nutrients, interpreted by the Br-concentrations and the marine signals (Sr, Cl, Ba/Ce) in the sediments, (b) The hydropower development in 1968 which reduced freshwater runoff from land by 75 to 80% and led to a corresponding reduction in the supply of minerogenic nutrients to the Framfjord, interpreted by the Br-, Si- and K-concentrations in the sediments, and (c) The fish hatchery on land by the Indrefjord since 1986 where the sediments show a varying impact on the fjords related to changes in the operation of the hatchery, interpreted by S- and the Br-concentrations in the sediments. In addition, the sediment signals of the Br-, Si- and K-concentrations can be interpreted that the continuously increasing rainfall in the area over the last 100 years has masked some of the negative effect that the hydropower development has had on the environment in Framfjorden. The variations in the sulfur concentration allow the assumption that all three fjord areas have been oxic over the last 100 years, and the least oxic in the Indrefjord.

The sedimentary changes over time have been further interpreted in space in accordance with the spread of the environmental signals through the water's circulation pattern in the Arnafjord system.

Forord

Vil først og fremst si en stor takk til min veileder Matthias Paetzel. Tusen takk for de mange timene med fantastisk veiledning, både i og utenfor arbeidstiden. Tusen takk for all kunnskapen du delte med meg, din tålmodighet og støtte.

Takk til Haflidi Haflidason for innsamlingen og analysen av kjerneprøvene ved Earthlab, Universitetet i Bergen. Takk til forskningsgruppen Fjord ved Institutt for miljø- og naturvitenskap ved Høgskulen på Vestlandet for motiverende og lærerike fredagsmøter.

En stor takk til alle lærere og medstudenter som har bidratt til å gjøre disse tre årene i Sogndal så minneverdig og fine som de har vært. Og til slutt en stor takk til familie og venner for all den støtten dere har gitt de siste tre årene!

Halden, 03.06.2021

Anna Elise Kvamme Grønlund

Innholdsfortegnelse

| | |
|---|-----------|
| SAMMENDRAG | I |
| ABSTRACT | II |
| FORORD | IV |
| FIGURLISTE | VI |
| TABELLISTE | IX |
| <u>1 INNLEDNING</u> | <u>1</u> |
| 1.1 BAKGRUNN | 1 |
| 1.2 MÅLSETTINGER | 2 |
| MÅLSETTING 1 | 2 |
| MÅLSETTING 2 | 2 |
| MÅLSETTING 3 | 2 |
| 1.3 FORKLARING TIL MÅLSETTINGER | 2 |
| <u>2 TEORETISK BAKGRUNN</u> | <u>4</u> |
| 2.1 OMRÅDEBESKRIVELSE | 4 |
| 2.2 GEOLOGI | 7 |
| 2.3 MILJØENDRINGER OVER DE SISTE 100 ÅR | 10 |
| 2.3.1 MENNESKESKAPTE ENDRINGER | 10 |
| 2.3.2 NATURLIGE ENDRINGER | 11 |
| <u>3 METODE</u> | <u>12</u> |
| 3.1 PRØVETAKNING | 12 |
| 3.2 OPTISKE BILDER OG RØNTGENBILDER | 13 |
| 3.3 RØNTGENFLUORESCENS (XRF) | 14 |
| 3.3.1 INKOHRENS/KOHERENS (INK/KOH) | 15 |
| 3.3.2 ELEMENTANALYSE OG KORRELASJON AV XRF-DATA | 15 |
| 3.4 MAGNETISK SUSCEPTIBILITET | 16 |
| 3.5 DATERING | 16 |
| <u>4 RESULTATER</u> | <u>17</u> |
| 4.1 PRØVETAKING | 17 |
| 4.2 OPTISKE BILDER OG RØNTGENBILDER | 18 |
| 4.3 RØNTGENFLUORESCENS (XRF) | 20 |
| 4.3.1 INKOHRENS OG KOHERENS (INK/KOH) | 20 |
| 4.3.2 ELEMENTANALYSE OG KORRELASJON AV XRF-DATA | 21 |
| 4.4 MAGNETISK SUSCEPTIBILITET | 27 |

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 4.5 | DATERING | 28 |
| 5 | DISKUSJON | 31 |
| 5.1 | DATERING | 31 |
| 5.2 | ELEMENTANALYSE | 34 |
| 5.2.1 | ORGANISKE INDIKATORER | 34 |
| 5.2.2 | MINEROGENE INDIKATORER | 39 |
| 5.3 | SIRKULASJONS- OG SPREDNINGSMØNSTERET | 41 |
| 6 | KONKLUSJON | 49 |
| 7 | REFERANSER | 50 |
| 7.1 | LITTERATUR | 50 |
| 7.2 | NETTSIDER | 52 |
| | APPENDIKS | 54 |

Figurliste

| | | |
|-----------------|---|----|
| Figur 1. | Oversiktsbilde som viser studieområdet. Kart hentet fra Kartverket (http 1) | 4 |
| Figur 2. | Batymetrisk kart over Arnafjordsystemet, hvor det dypeste punktet i Arnafjordbassenget er markert med lilla og terskelen mot Arnafjorden med brun farge (Bucher, 2020). | 5 |
| Figur 3. | Hydrografiske målinger tatt av HVL 9/12/2020. Viser oksygeninnhold i mg/l, salinitet oppgitt i PSU (Practical Salinity Unit), temperatur i °C (grader Celsius) og tetthet gitt med kg/m ³ . | 6 |
| Figur 4. | Berggrunnskart over studieområdet med hovedbergartene migmatitt, granodiorittisk gneis, fyllitt og kvartsskifer. Kart og informasjon hentet fra NGU (http 3). | 7 |
| Figur 5. | Oversiktsbildet med miljøendringene ved fjordsystemet. (1) Skredet ved Nese i 1811; (2) Gruveutvinningen fra 1907-1984 og nedleggelsen av mølledriften i 2002; (3) Vassdragsutbyggingen som startet i 1968; (4) Settefiskanlegget på land som startet opp i 1986. | 11 |
| Figur 6. | Nedbørsgraf av Vik kommune fra perioden 1900-2019 med data fra eKlima (http 4). Blå linje viser nedbørmengde per år, og oransje linje er en lineær trendlinje. | 12 |
| Figur 7. | Komponentene i en ITRAX kjerneskaner, hentet fra Croudace et al. (2006). (A) Optisk kamera, (B) Lasertrianguleringssystem som måler topografien i kjernen og sørger for at detektoren alltid måler fra lik avstand gjennom kjernen, (C) XRF detektor, (D) | |

| | |
|---|----|
| Røntgenkilde, (E) Strålingsinnretning og (F) Røntgenkamera. Pilen viser hvilken retning kjernen beveger seg. _____ | 14 |
| Figur 8. Posisjonen til hvor de tre sedimentkjernene har blitt tatt i fjordsystemet, kjernenavn og navn på fjorden samt dato for prøvetaking. Bildet hentet fra Norge i Bilder (http 8). ____ | 18 |
| Figur 9. Resultater av optiske bilder og røntgenbilde med dybdeakse for GC06 fra Arnafjordbassenget, MC04 fra Indrefjorden og MC05 fra Framfjorden. Hvit linje gjennom det optiske bildet og røntgenbildet i GC06 og MC04 viser det som er tolket av Bucher (2020) til å være skredtoppen fra skredet i 1811. _____ | 19 |
| Figur 10. Resultat med inkoherens/koherens fra XRF analysen for de tre kjernene mot sedimentdyp i cm. _____ | 21 |
| Figur 11. Elementer i Arnafjordbassenget som viste en korrelasjon mot dyp eller seg imellom fra Tabell 5. Fra venstre; silisium (Si/Fe) og kalium (K/Fe). Deretter videre mot høyre: klor (Cl/Fe), brom (Br/Fe), strontium (Sr/Fe) og zirkon (Zr/Fe). _____ | 24 |
| Figur 12. Elementer fra Arnafjordbassenget som viste en negativ korrelasjon seg imellom fra Tabell 5. Til venstre vises graf for barium (Ba/Fe) og til høyre cerium (Ce/Fe). _____ | 25 |
| Figur 13. Elementer i Indrefjorden som viste en korrelasjon mot dyp eller seg imellom. Fra venstre; silisium (Si/Fe) og kalium (K/Fe). Deretter videre mot høyre: klor (Cl/Fe) og brom (Br/Fe). Deretter videre mot høyre: barium (Ba/Fe) og cerium (Ce/Fe). _____ | 26 |
| Figur 14. Elementene i Framfjorden som viser en korrelasjon mot dyp eller seg imellom. Fra venstre; silisium (Si/Fe) og kalium (K/Fe). Deretter videre mot høyre: svovel (S/Fe) og klor (Cl/Fe). Deretter videre mot høyre: barium (Ba/Fe) og cerium (Ce/Fe). _____ | 27 |
| Figur 15. Resultat ved magnetisk susceptibilitet vist for alle tre kjernene. Grafene har en dybdeskala med cm som enhet. _____ | 28 |
| Figur 16. Dateringen av kjerne GC06 fra Arnafjordbassenget. Svart linje viser dateringshorisonten fra skredet i 1811. (Ink/koh)- og nedbørstopper er markert med oransje farge, og nedgangene med grå farge. Grafene til venstre viser de assosierte toppene markert med bokstavene A-I, og grafene til høyre viser resultatet etter omregning fra dybde til tid samt de assosierte toppene med bokstaver. _____ | 29 |
| Figur 17. Datering av kjerne MC04 fra Indrefjorden. Svart linje viser til dateringshorisonten fra 1811 skredet. (Ink/koh)- og nedbørstopper er markert med oransje farge, og nedgangene med grå farge. Grafene til venstre viser de assosierte toppene markert med bokstavene A-I, og grafene til høyre viser resultatet etter omregning fra dybde til tid samt de assosierte toppene med bokstaver. _____ | 30 |
| Figur 18. Datering av kjerne MC05 fra Framfjorden. Svart stiplet linje er satt ved siste punkt i ink/koh graf, og satt til 1811. (Ink/koh)- og nedbørstopper er markert med oransje farge, og nedganger med grå farge. Til venstre vises de assosierte toppene markert med bokstavene A-I, og grafene til høyre viser resultatet etter omregning fra dybde til tid samt de assosierte toppene med bokstaver. _____ | 30 |

- Figur 19.** Detaljerte sedimentasjonsrater fra 1908-2020 og de lineære sedimentasjonsratene beregnet av Bucher (2020) fra 1811-2020 for de tre sedimentkjernene. Grafen viser blå linje for Arnafjordbassenget, oransje linje for Indrefjorden og grønn linje for Framfjorden, hvor de stiplede linjene er de lineære sedimentasjonsratene (Bucher 2020). To tabeller viser sedimentasjonsrater i cm/år, og det er bare beregnet sedimentasjonsrater for toppene sett i Figur 16, 17 og 18. _____ 32
- Figur 20.** Skisse som viser utslipp av ferskvann i sjø. Figur hentet fra (Tveranger et al. 2007). _____ 35
- Figur 21.** Brom (Br/Fe) for alle tre kjernene med tidsskala. Miljøendringene i studieområdet er markert med ulike farger og har sin egen legende. _____ 36
- Figur 22.** Residual svovel i de tre kjernene. Oransje blokk markerer områdene (ved omtrentlig sedimentdyp) der residual svovel begynner å øke nedover sedimentkjernene. Grafene er vist med dybdeskala i cm. _____ 39
- Figur 23.** Grafer av silisium og kalsium for alle tre sedimentkjerner med kalenderår som enhet. Miljøendringene i studieområdet er markert i ulike farger og beskrevet med egen legende. _____ 41
- Figur 24.** Gruve og talkmøllen sin påvirkning i Arnafjordsystemet. Viser 3 forskjellige perioder av gruve og talkmølledriften; (A) 1907-1984 aktiv gruve drift og mølledrift, (B) 1984-2002 gruve drift over og bare drift i talkmøllen, og (C) 2002-2020 hvor talkmøllen gikk ut av drift. Lokaliteten for de tre sedimentkjernene er markert med oransje prikker. Grå piler viser tolkningen for sirkulasjonsmønsteret i Arnafjordsystemet. Røde piler viser kildene, her gruve drift og talkmøllen i tettstedet Framfjord. _____ 43
- Figur 25.** Vassdragsutbyggingen sin påvirkning i Arnafjordsystemet, vist i tidshorisonter fra (A) før og (B) etter vassdragsutbyggingen. Lokaliteten for de tre sedimentkjernene er markert med oransje prikker. Grå piler viser tolkningen for sirkulasjonsmønsteret i Arnafjordsystemet. Røde piler markerer kilden, her to elver (Dalselvi og Tura) som fikk redusert vanntilførsel. 44
- Figur 26.** Settefiskanlegget sin påvirkning i Arnafjordsystemet fra 2013 til 2020, se Figur 27 for 1986 til 2013. Viser 2 ulike perioder med settefiskanlegget; (C) 2013-2016 viser opphold av settefiskanlegget grunnet konkurs og (D) 2016-2020 som viser gjenopptatt drift med redusert mengde settefisk etter 2016. Lokaliteten for de tre sedimentkjernene er markert med oransje prikker. Grå piler viser tolkningen for sirkulasjonsmønsteret i Arnafjordsystemet. Rød pil markerer kilden, her settefiskanlegget på land i tettstedet Indrefjord. _____ 46
- Figur 27.** Settefiskanlegget sin påvirkning i Arnafjordsystemet fra 1986 til 2013, se Figur 26 for 2013 til 2020. Viser 2 ulike perioder med settefiskanlegget; (A) 1986-1995 oppstart av anlegget og effekt første 4 årene og (B) 1995-2013 viser effekten av settefiskanlegget i full drift. Lokaliteten for de tre sedimentkjernene er markert med oransje prikker. Grå piler viser tolkningen for sirkulasjonsmønsteret i Arnafjordsystemet. Rød pil markerer kilden, her settefiskanlegget på land i tettstedet Indrefjord. _____ 47

Tabelliste

- Tabell 1.** Hovedbergartene i området, med de vanlige mineralene og deres kjemiske formel. Informasjon om mineralinnhold og deres kjemiske formel er hentet fra «Introduction to mineralogy» (Nesse 2012). _____ 9
- Tabell 2.** Hovedbergartene i området med tilleggsbergarter som er registrert. Det er ikke registrert hvor mye, eller hvor disse tilleggsbergartene opptrer. Informasjonen er hentet fra NGU ([http 3](http://3)). _____ 10
- Tabell 3.** Navnene som blir brukt på de tre kjernene, på hvilken lengde- og breddegrad de ble tatt, på hvilket dyp og hvor lange kjernene er. Informasjonen er fra Universitet i Bergen ved Institutt for geovitenskap. _____ 17
- Tabell 4.** Resultat av korrelasjonstest med dyp mot element. Korrelasjonskoeffisienten er gitt for Arnafjordsbassenget, Indrefjorden og Framfjorden. Tabellen gir også forklaring til endring i elementet som har ført til korrelasjonen. _____ 22
- Tabell 5.** Resultat av korrelasjonstest mellom element mot element. De ulike elementene som viser korrelasjon, og korrelasjonskoeffisienten ved Arnafjordsbassenget, Indrefjorden og Framfjorden. Positiv korrelasjonskoeffisient viser til at elementene øker/minker samtidig, negativ korrelasjonskoeffisient viser at elementene oppfører seg motsatt av hverandre. ____ 23

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Sedimentene i det oksiske Arnafjordsystemet, bestående av den åpne Arnafjorden i nord, Framfjorden i sørøst, Indrefjorden i sørvest og det 107 m dype Arnafjordbassenget der de tre fjordarmene møtes (Figur 1), har i 2020 blitt undersøkt for innvirkninger av miljøendringer gjennom de siste 100 årene (Bucher 2020, DeKorte 2021).

Bucher (2020) bestemte lineære sedimentasjonsrater av 0,11 til 0,14 cm/år målt mellom sedimentoverflaten av 2020 og toppen av de sedimentære signalene fra et av Norges største ras som fant sted ved Nese rett vest for Arnafjordbassenget i 1811 (Figur 5; Furuseth 2006, Høst 2006, Sæbø 2000). Videre undersøkte Bucher (2020) diatoméer og partikulært materiale på smørerpreparater fra de siste 100 år. Han relaterte endringene i disse til gruvevirksomheten (talkgruver med talkmølle) ved tettstedet Framfjord fra 1907 til 1984 (Lee 1989, Starheim 2011), vassdragsutbygging med over 75 til 80% reduksjon av ferskvannstilførselen i Dalselvi, Tura og Målsetevatnet i 1968 (Appelgren & Ledje 2016, Dårflot & Nævdal 2020) og urensset utslipp fra et landbasert settefiskanlegg ved tettstedet Indrefjord siden 1986 (Tveranger et al. 2007). Hendelsene er illustrert i Figur 5. I tillegg brukte DeKorte (2021) resultatene av Bucher (2020) for å forklare årsakene i endringer av sammensetningen i bentiske formeminerer i Arnafjordsystemet. Begge viser til hydrografiske sammenhenger mellom de enkelte fjordarmene og de dokumenterte og observerte miljøendringene, og begge tar i betraktning innflytelse fra klimaendringer over de siste 100 år.

Undersøkelsene av Bucher (2020) og DeKorte (2021) innebærer flere utfordringer. De lineære sedimentasjonsratene av Bucher (2020) gir en generell tidsramme for avsetningene, men fanger ikke opp detaljer i henhold til utviklingen av miljøendringene langs den historiske tidsaksen. Videre baserer resultatene fra diatoméene og det partikulære materialet seg utelukkende på smørepreparatene som ifølge Rothwell (1989) gir en bra, generell oversikt over den *in situ* sammensetningen av sedimentene. Allikevel ville enkelte organiske og minerogene sammenhenger nok kunne bekreftes med fordel av uavhengige, geokjemiske undersøkelser, særlig i henhold til å skille terrestriske fra marine innflytelser (Croudace et al. 2006). Tolkningen av endringene i sammensetningen av diatoméene (Bucher 2020) og de

bentiske foraminiferne (DeKorte 2021) vil også kunne tjene på en mer detaljert datering av sedimentene.

Denne bacheloroppgaven har derfor en ambisjon om å utføre en detaljert datering av sedimentene fra alle tre fjordområder samt en uavhengig geokjemisk XRF elementanalyse (Croudace et al. 2006, Jenkins 1999, Rothwell & Rack 2006) av sedimentene for verifisering av resultatene av spesielt Bucher (2020).

1.2 Målsettinger

Målsetting 1: Er det mulig å konvertere dybdeaksen av sedimentære parametere i sedimentkjernen fra Arna fjordsystemet til en detaljert tidsakse ved å bruke den nedbørsrelaterte dateringsmetoden foreslått av Paetzel & Dale (2010)?

Målsetting 2: Viser de geokjemiske XRF elementprofilene endringer over tid og kan disse endringene relateres til de historiske miljøendringene og dermed til sine respektive kilder?

Målsetting 3: Er det mulig å lage en modell av mønsteret for hvordan miljøendringene kan ha påvirket elementsammensettingen av sedimentene og spredd seg i fjordsystemet?

1.3 Forklaring til målsettinger

Målsetting 1: *Er det mulig å konvertere dybdeaksen av sedimentære parametere i sedimentkjernen fra Arna fjordsystemet til en detaljert tidsakse ved å bruke den nedbørsrelaterte dateringsmetoden foreslått av Paetzel & Dale (2010)?*

For å tolke sedimentære endringer i fjordsystemet er det nødvendig med en datering som kan gi en indikator på når en eventuell endring fant sted.

Bucher (2020) har vist at de geokjemiske inkoherens/koherens-grafen av sedimentene tilsvarer i stor detalj avrenningsmønsteret fra lokal nedbør over de siste 100 år.

Inkoherens/koherens-forholdet forteller noe om fastheten av sedimentet som bestemmes av andel organisk materiale, kornstørrelser og sedimentenes porevolum eller porøsitet (Croudace et al. 2006, Rothwell & Rack 2006):

- Høy inkohrens indikerer mindre fast sediment som kan antyde mer organisk materiale eller større porevolum.
- Høy koherens viser til fastere sediment, som indikerer mer minerogent materiale eller større tetthet grunnet mindre porevolum.

Ifølge Berner & Berner (1987) vil økt nedbør gi økt avrenning, og økt avrenning vil kunne resultere i mer terrestrisk organisk materiale som transporteres ut i fjordsystemet. I tillegg vil økt avrenning også øke tilførselen av minerogene næringsstoffer fra land, noe som kan føre til økt primærproduksjon og dermed økt andel av marint organisk materiale i det marine miljøet (Berner & Berner 1987). Denne sammenhengen mellom parallelle variasjoner av nedbør og partikulært materiale ble brukt av Paetzel & Dale (2010) for datering av fjordsedimenter ved å sette opp forholdet mellom nedbøravhengige sedimentære parametere (kornstørrelser, organisk materiale og ferskvannsdiaatomer) mot tidsserier av lokal nedbør. Det samme prinsippet overføres i denne oppgaven til å gjelde forholdet mellom nedbør og inkohrens/koherens-forholdet, og er forventet til å gi utslag for en datering med en frekvens av dateringspunkt på mellom fem og ti år.

Målsetting 2: *Viser de geokjemiske XRF elementprofilene endringer over tid og kan disse endringene relateres til de historiske miljøendringene og dermed til sine respektive kilder?*

Analyse av sediment ved bruk av røntgenfluorescens (XRF; Jenkins 1999) med en ITRAX Kjerne Skanner (ved Earthlab, Universitetet i Bergen) vil gi en oversikt over fordelingen av de kjemiske elementene i de marine sedimentkjernene (Croudace et al. 2006, Rothwell & Rack 2006). Metoden tillater å sette opp diverse forhold mellom de kjemiske elementene som tillater tolking i henhold til kvaliteten av det partikulære materiale, der for eksempel marint organisk materiale, det minerogene materialet og til og med tungmetallforurensning (Pb, Zn, Cu) kan identifiseres (Croudace et al. 2006). Dybdeaksen til elementene skal konverteres til en tidsakse ved hjelp av dateringen fremlagt i første målsetting. Dateringen vil gjøre det mulig å tilordne endringene i elementsammensetningen til de omtalte dokumenterte miljøendringene og dermed sine respektive kilder.

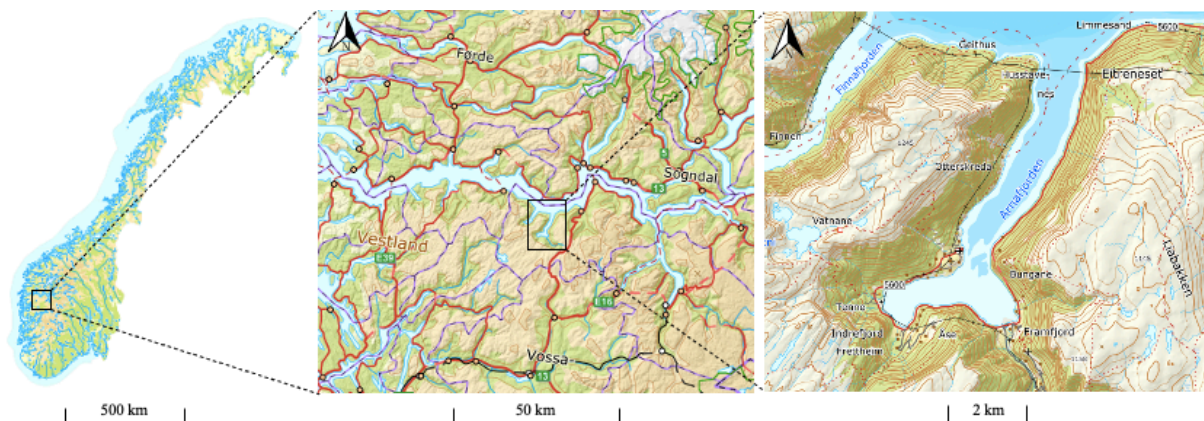
Målsetting 3: *Er det mulig å lage en modell av mønsteret for hvordan miljøendringene kan ha påvirket elementsammensetningen av sedimentene og spredd seg i fjordsystemet?*

Det vil bli analysert om de observerte endringene i elementsammensetningen skjer punktuelt eller om de er synlige i alle kjernene fra de tre fjordbassengene. Dersom en kan påpeke en endring og kjenne til kilden til endringen, blir det mulig å sammenligne samme elementsignal i samme tidsrom fra de tre kjernene. Ved å sammenligne en eventuell økning eller minking i elementene i samme tidsrom, kan det gi en indikasjon på hvordan miljøendringene har spredd seg i hele fjordsystemet. Målet er å lage en enkel modell som illustrerer denne spredningen og tilhørende årsaker.

2 Teoretisk bakgrunn

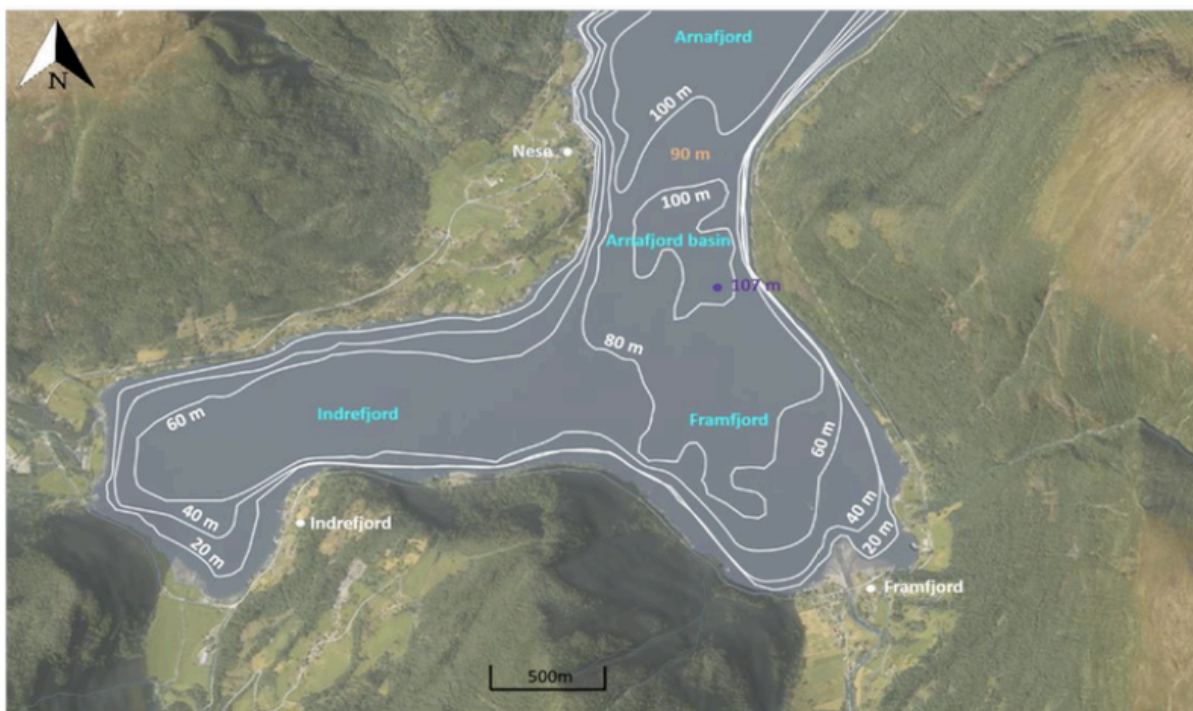
2.1 Områdebeskrivelse

Arnafjorden (Figur 1) er en sørgående fjordarm av Sognefjorden, hvor den videre deler seg inn i Framfjorden i øst og Indrefjorden i vest (Figur 2). Fjordsystemet ligger i Vik kommune, i Vestland fylke.



Figur 1. Oversiktsbilde som viser studieområdet. Kart hentet fra Kartverket (<http> 1)

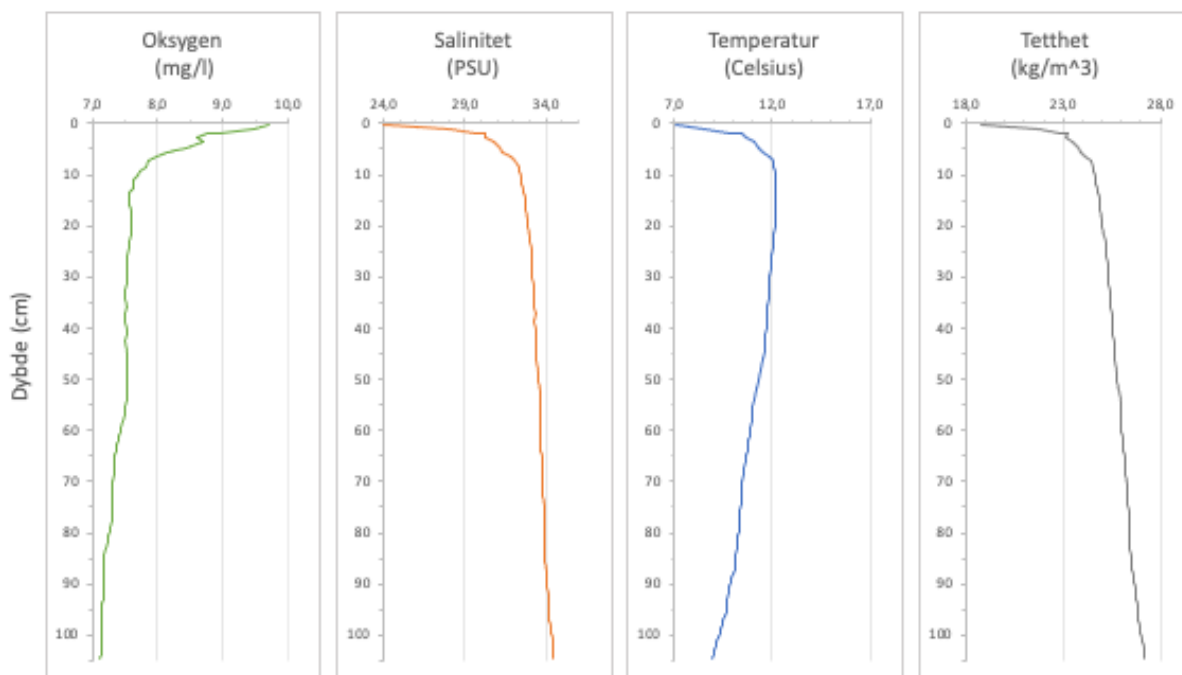
Arnafjorden er på sitt dypeste ved munningen til Sognefjorden, hvor den er 207 meter dyp (<http> 2). Ved grensen til Framfjorden og Indrefjorden danner Arnafjorden et basseng med en terskel på rundt 90 meter vanndyp og en maksimaldybde på 107 meter, heretter kalt Arnafjordbassenget (Figur 2). Framfjorden i øst er dypest ved 88 meter, og Indrefjorden i vest er på sitt dypeste ved 71 meter. Arnafjordbassenget, Framfjorden og Indrefjorden danner sammen Arnafjordsystemet.



Figur 2. Batymetriske kart over Arnafjordsystemet, hvor det dypeste punktet i Arnafjordbassenget er markert med lilla og terskelen mot Arnafjorden med brun farge (Bucher, 2020).

I Figur 3 kan en se de hydrografiske målingene som ble gjennomført i Arnafjordbassenget av Høgskulen på Vestlandet (HVL) med en CDT-sonde den 9 desember 2020.

Oksygenkonsentrasjonen synker fra 9,6 mg/l til 7,5 mg/l mellom 0 cm til 12 cm vanddyb. Fra 12 cm holder konsentrasjonen seg stabil på 7,5 mg/l frem til 60 meters vanddyb, før det så synker til sitt laveste på 7,1 mg/l, som viser til at Arnafjordbassenget er oksisk om vinteren. Saliniteten i Arnafjordbassenget øker med dybden, og er på sitt laveste ved overflaten. Lavest salinitet på 24 PSU, og maksimalt ved 35 PSU. Temperaturen er på sitt laveste ved overflaten, hvor den er på 7°C grader celsius, før det øker til 12°C ved 7,5 meters vanddyb og holder seg stabilt frem til 50 meters dyp, før den gradvis synker til 9,5°C mot bunnen. CTD-målinger gjennomført av Universitet i Bergen den 20 juni 2020 (Bucher 2020) viser en oksygenkonsentrasjon på rundt 5mg/l nedenfor 60 meter vanddyb i Arnafjordbassenget noe som indikerer oksiske forhold selv på sommertid.



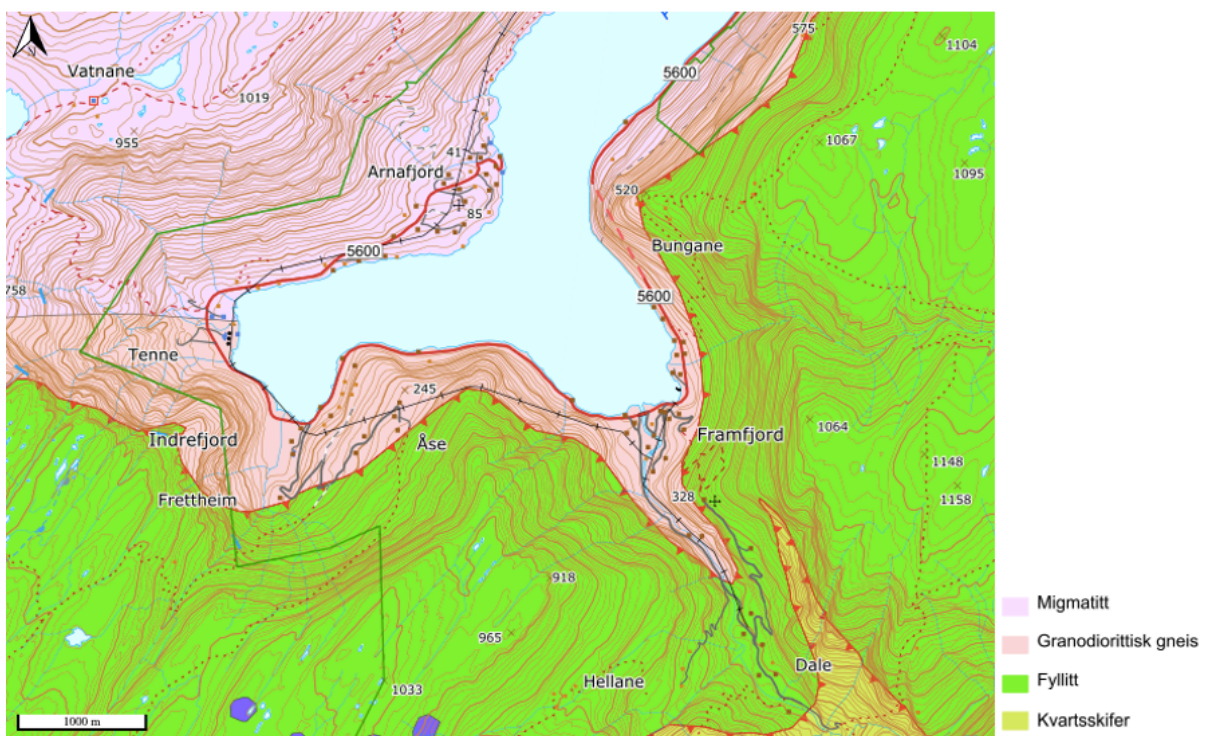
Figur 3. Hydrografiske målinger tatt av HVL 9/12/2020. Viser oksygeninnhold i mg/l, salinitet oppgitt i PSU (Practical Salinity Unit), temperatur i °C (grader Celsius) og tetthet gitt med kg/m³.

Åkerblå AS foretok en punktutslippsundersøkelse i Indrefjord på vegne av Firda Settefisk AS i 2020, hvor de også tok hydrografiske målinger. Deres målinger ble foretatt vest for sedimentkjernen MC04 (Figur 5), som er nærmere kysten. De rapporterte at saliniteten økte fra overflaten og ned til 20 meters dyp, hvor den stabiliserte seg på 35‰ (Liugman & Slettebø 2020). Temperaturen svingte i de øverste vannlagene, men sank kontinuerlig til 20 meters vanddyb. Bunnvannet ble vurdert som «svært godt» både når det kom til oksygeninnhold og oksygenmetning som var over 7mg/l og 75% (Liugman & Slettebø 2020).

Strømmålinger utført av Sub Aqua Tech AS i april-juni 2020 viste til at vannet i Indrefjord hadde en dominerende strømkraft i sørlig retning (Leknes 2020). Strømhastigheten på 5 meters vanddyb var i gjennomsnitt 4,5 cm/s med en maksimal strømhastighet på 15,7 cm/s, og på 35 meters dyp var den gjennomsnittlige hastigheten på 3,0 cm/s med maksimal hastighet på 10,9 cm/s (Leknes 2020). Strømriggeren var plassert i nærheten av utslippsrøret til settefiskanlegget i Indrefjord, og hvor sedimentkjerne MC04 (Figur 5) er tatt.

2.2 Geologi

Bergartene langs fjordsystemet stammer fra to ulike geologiske perioder. Migmatitt og den granodiorittiske gneisen i nord av området (Figur 4) ble dannet under proterozoikum i middel til sen prekambrium som varte fra rundt 2.500 til 541 millioner år siden. Fyllitten og kvartsskiferen i sør (Figur 4) ble omdannet og transportert som skyvedekker over grunnfjellet under den kaledonske fjellkjededannelsen som nådde sitt maksimum i silur i fanerozoikum for om lag 430 til 415 millioner år siden ([http 3](http://3)) (Ramberg et al. 2013). Dette gjenspeiles også i graden av metamorfose bergartene har gjennomgått. Migmatitt og granodiorittisk gneis har gjennomgått en høygradsmetamorfose før fyllitten og kvartsskiferen i det hele tatt ble dannet. Under den kaledonske fjellkjededannelsen ble fyllitten og kvartsskiferen dannet ved lavgradsmetamorfose, som også påvirket bergartene fra prekambrium.



Figur 4. Berggrunnskart over studieområdet med hovedbergartene migmatitt, granodiorittisk gneis, fyllitt og kvartsskifer. Kart og informasjon hentet fra NGU ([http 3](http://3)).

Mot slutten av prekambrium begynte superkontinentet Rodinia å dele seg opp i mindre kontinenter, hvor Laurentia og Baltika var to av disse mindre kontinentene. Laurentia som i dag er deler av Nord-Amerika, og Baltika, som i dag utgjør mesteparten av Skandinavia, begynte å drive fra hverandre og imellom disse ble Iapetushavet dannet. Med havbunnsbredningen ble også flere øybuer dannet, som senere skulle kollidere med

kontinentene. I middel ordovicium endret platebevegelsen seg fra å være en divergent platebevegelse med havbunnsbredning til en konvergent platebevegelse. Kontinentene Laurentia og Baltica kolliderte så med hverandre, hvor Baltica dukket under.

Ved kollisjonen av kontinentene ble det dannet flere skyvedekker. Fyllitten i området tilhører Fortun-Vang dekket, som er den undre dekkeserien, og stammer fra sedimentene i Iapetushavet og den baltiske randen, samt sedimentære avsetninger på det baltiske skjoldet (Ramberg et al. 2013). Kwartsskiferen i sør-øst tilhører Grasbergdekket som tilhører Jotundekkekomplekset, som er den midtre dekkeserien. Som ved den undre dekkeserien, kan den ha stammet fra den baltiske randen, men kan også ha forflyttet deler av grunnfjellssøyler eller mikrokontinenter som har eksisterte i Iapetushavet (Ramberg et al. 2013). Migmatitten og den granodiorittiske gneisen er nær stedseget grunnfjell og er autoktone, de har altså ikke blitt forflyttet på samme måte som fyllitten og kvartsskiferen har, som er alloktone (http 3).

I paleogen og neogen, for rundt 65 til 2,6 millioner år siden, gikk landet gjennom flere landhevninger innledet av platedriften som førte til åpningen av Norskehavet i midten av Tertiær (Ramberg et al. 2013). Landhevningen førte til dannelsen av den paleiske overflaten med påfølgende økt forvitring der elver eroderte landskapet. I pleistocen, 2,6 millioner til 11.700 år siden, begynte de lokale breene ved fjellene å vokse frem og bevege seg i perioder med kjøligere klima, og fulgte stort sett de allerede eroderte elvedalene (Ramberg et al. 2013). Gjennom totalt 23 glasiasjoner og mellomistider ble disse dalene mer og mer erodert, og noen av dalene ble erodert til under havnivået. Det er disse dalene som i dag fremstår som fjorder.

Mineralene i de ulike bergartene med deres kjemiske formel kan sees i Tabell 1. Mineralene som er satt opp er de som vanligvis vil være til stede i de ulike bergartene, men flere mineraler kan opptre i hver bergart. De kjemiske formlene i Tabell 1 viser en mulig sammenheng mellom elementfordelingen i sedimentene og mineralforekomsten i området.

Tabell 1. Hovedbergartene i området, med de vanlige mineralene og deres kjemiske formel. Informasjon om mineralinnhold og deres kjemiske formel er hentet fra «Introduction to mineralogy» (Nesse 2012).

| Bergart | Mineraler | Formel |
|-------------------------|------------------|---|
| Migmatitt | Kvarts | SiO_2 |
| | Plagioklas | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ |
| | Ortoklas | KAlSi_3O_8 |
| | Biotitt | $\text{K(Fe,Mg)}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ |
| | Ortopyrosken | $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ |
| | Cordieritt | $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5)\text{O}_{18}$ |
| Granodiorittisk gneis | Kvarts | SiO_2 |
| | Plagioklas | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ |
| | Ortoklas | KAlSi_3O_8 |
| Kvartsskifer Fyllitt | Kvarts | SiO_2 |
| | Plagioklas | $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ |
| | Muskovitt | $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ |
| | Biotitt | $\text{K(Fe,Mg)}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ |
| | Kloritt | $(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{OH})_6$ |
| | Kloritoid | $(\text{Fe}^{2+},\text{Mg,Mn})_2(\text{Al,Fe}^{3+})$ |
| | Cordieritt | $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5)\text{O}_{18}$ |
| | Staurolitt | $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{O}_6[(\text{Si,Al})\text{O}_4]_4(\text{OH})_2$ |
| | Talk | $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ |

Det er også flere tilleggsbergarter i området, men det er ikke blitt kartlagt hvor mye, eller hvor de opptrer. De ulike tilleggsbergartene kan en se i Tabell 2.

Tabell 2. Hovedbergartene i området med tilleggsbergarter som er registrert. Det er ikke registrert hvor mye, eller hvor disse tilleggsbergartene opptrer. Informasjonen er hentet fra NGU ([http 3](http://3)).

| Bergart | Tilleggsbergarter |
|-----------------------|--------------------------|
| Migmatitt | Granittisk gneis |
| | Granodioritt |
| | Øyegneis |
| Granodiorittisk gneis | Båndgneis |
| | Kvartsitt |
| Kvartsskifer | Glimmerskifer |
| | Marmor |
| | Konglomerat |
| Fyllitt | Metasandstein |
| | Konglomerat |

2.3 Miljøendringer over de siste 100 år

De siste 200 årene har det vært spesielt fire kilder til endringer i Arna fjordsystemet. Noen av dem har vært naturlige endringer, andre har vært menneskeskapte endringer.

2.3.1 Menneskeskapte endringer

De ulike menneskeskapte miljøendringer er oppsummert i Figur 5.

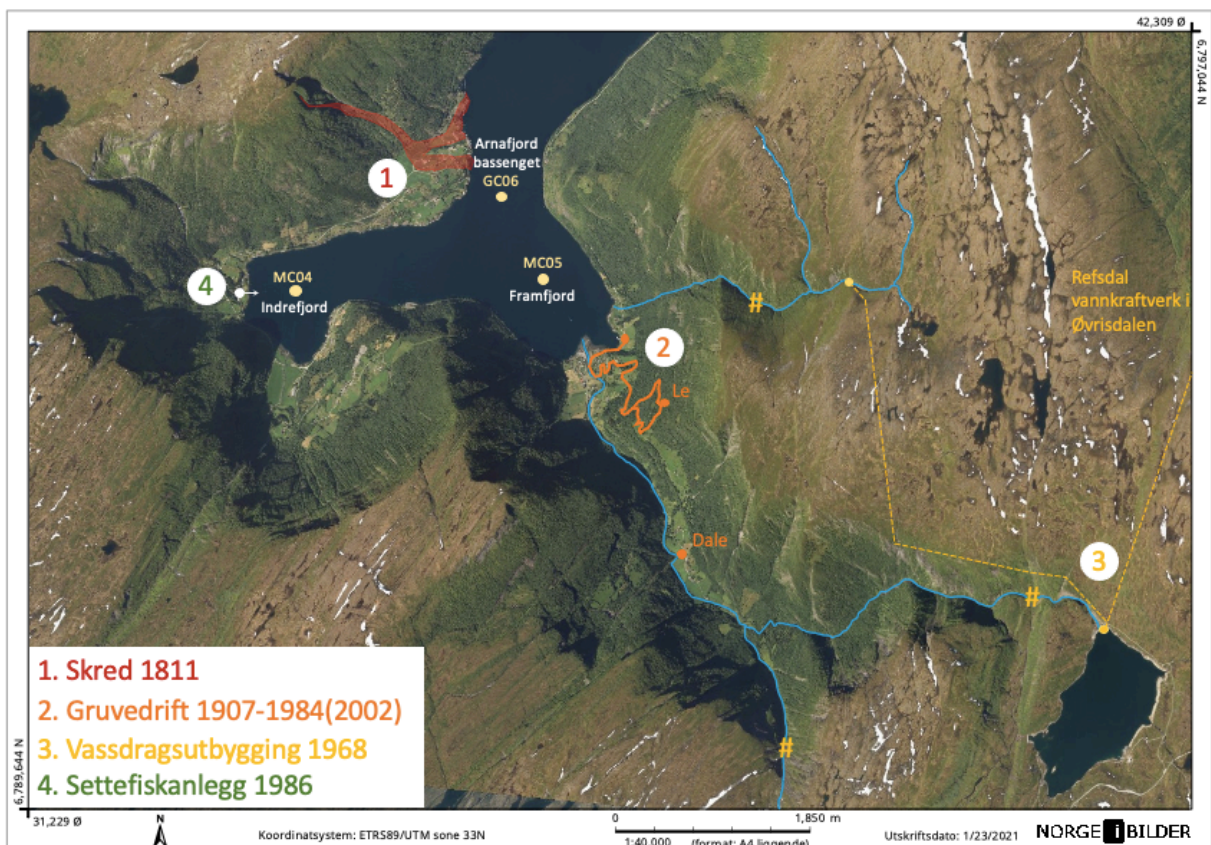
I 1907 startet gruueutvinningen av talk ved Le i Framfjord (Punkt 2 i Figur 5) under selskapet «Mineral og Kraft A/S», og var i full drift fra 1908 (Lee 1989). I mai 1925 tok talkmøllen fyr, og møllen samt bygningene ble totalskadde. Det førte til at selskapet «Mineral og Kraft A/S» gikk konkurs, og gruueutvinningen ble satt på pause frem til 1927 da Jakob Kjode kjøpte opp gruen, og det nye navnet ble «A/S Framfjord Talcmill» (Lee 1989). I 1942 ble det i tillegg drift i en talkgruve ved Dale, som ble utvidet i 1960. Utvinningen av talk skulle pågå frem til 1984, da en ikke kunne finne flere store nok forekomster til å drive gruvene videre.

Talkmøllen var derimot i drift fram til 2002 ved at de mottok råstoff med båttransport fra Mo i Rana (Starheim 2011).

I 1968 startet vassdragsutbyggingen i område (Punkt 3 i Figur 5). Vannkraftverket tar blant annet vann fra Målsetevatnet, som er en innsjø sør-øst for Framfjord. Målsetevatnet tilfører vann til Dalselvi og Tura som videre renner ut i Framfjorden. Oppstarten av vannkraftverket

har ført til at vanntilførselen i Målsetevatnet, Dalselvi og Tura har blitt redusert med 75% (Appelgren & Ledje 2016) og opptil 80% (Dårflot & Nævdal 2020).

Marine Harvest Norway AS startet i 1986 produksjonen av settefisk av laks og sjøørret ved tettstedet Indrefjord (Punkt 4 i Figur 5). Settefiskanlegget gikk konkurs i 2013 og sto tomt i 3 år før produksjonen startet opp igjen, da under selskapet Firda Settefisk Arnafjord AS (Grimelid 2016). Settefiskanlegget er lokalisert ved Indrefjorden, hvor de tar ferskvann fra elvene Breifoss og Sleipo samt UV-behandlet sjøvann fra fjorden (Tveranger et al. 2007). Etter at vannet er blitt brukt til produksjonen, slippes det urensset ut i Indrefjorden omtrent 60 meter fra land og på 30 meters vanddyp (Tveranger et al. 2007).



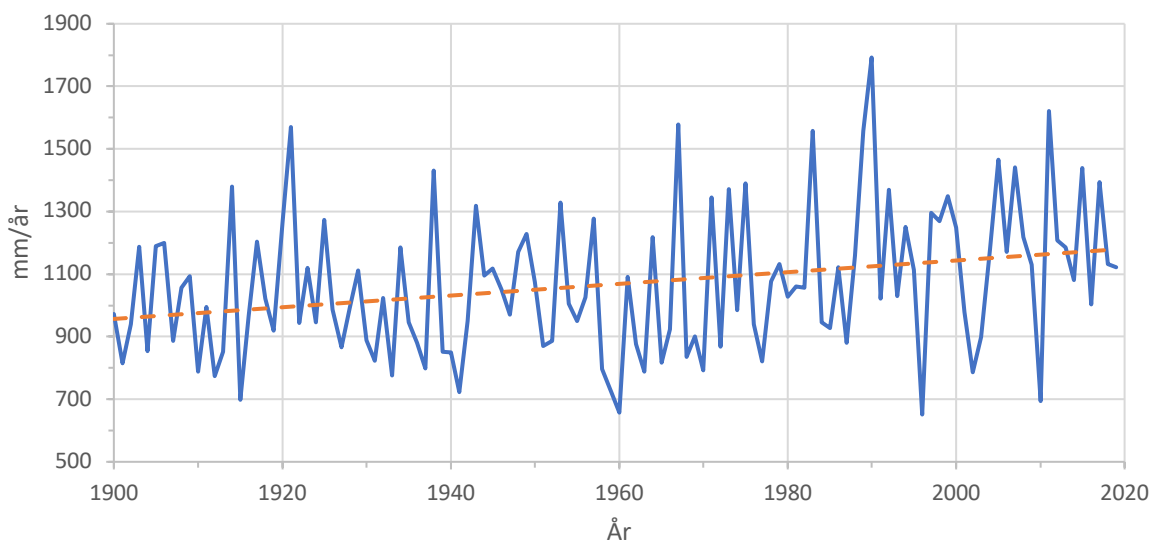
Figur 5. Oversiktsbildet med miljøendringene ved fjordsystemet. (1) Skredet ved Nese i 1811; (2) Gruveutvinningen fra 1907-1984 og nedleggelsen av mølledriften i 2002; (3) Vassdragsutbyggingen som startet i 1968; (4) Settefiskanlegget på land som startet opp i 1986.

2.3.2 Naturlige endringer

I 1811 gikk det et skred på Nese ved Arnafjorden (Punkt 1 i Figur 5) som førte til at 45 menneskeliv gikk tapt, hus ble forflyttet 600-700 meter ut i fjorden, og materialene ble ført

inn og ut av fjorden med tidevannet i nærmest en uke etter hendelsen (Sæbø 2000). Skredet på Nese er et av de største skredene i Norges historie og er synlig ved >1m mektige avsetninger i fjordsedimentene, som dokumentert av Bucher (2020) over 200 år etter hendelsen.

Klimaet er i endring, og det er uklart hvor mye disse klimaendringene kan ha påvirket fjordene og fjordmiljøet. Figur 6 viser en gradvis økning i nedbørsmengden de siste 119 årene, hvor trendlinjen starter i snitt på 960 mm/år i 1900 og øker gradvis til omkring 1200 mm/år i 2019. Økt mengde årsnedbør vil gi økt avrenning til fjordsystemet. Det igjen vil naturlig føre til at mer terrestrisk organisk materiale og fast og oppløst minerogent materiale vil bli erodert og avsatt i fjorden (Berner & Berner 1987).



Figur 6. Nedbørsgraf av Vik kommune fra perioden 1900-2019 med data fra eKlima ([http 4](http://4)). Blå linje viser nedbørsmengde per år, og oransje linje er en lineær trendlinje.

3 Metode

Feltarbeidet og analyser i laboratorium ble gjennomført i regi av Universitet i Bergen og Earthlab ved Institutt for geovitenskap.

3.1 Prøvetakning

Prøvetakingen ble foretatt av Universitet i Bergen (UIB) på forskningsbåten G.O.Sars på tokt GC20-229 den 20 juni 2020. Ved prøvetakingen ble to ulike metoder brukt. Ved kjerne GC06 i Arnafjordbassenget ble kjernen tatt med en gravity corer, mens ved sedimentkjernene MC05

i Framfjorden og MC04 i Indrefjorden ble det brukt en multicorer.

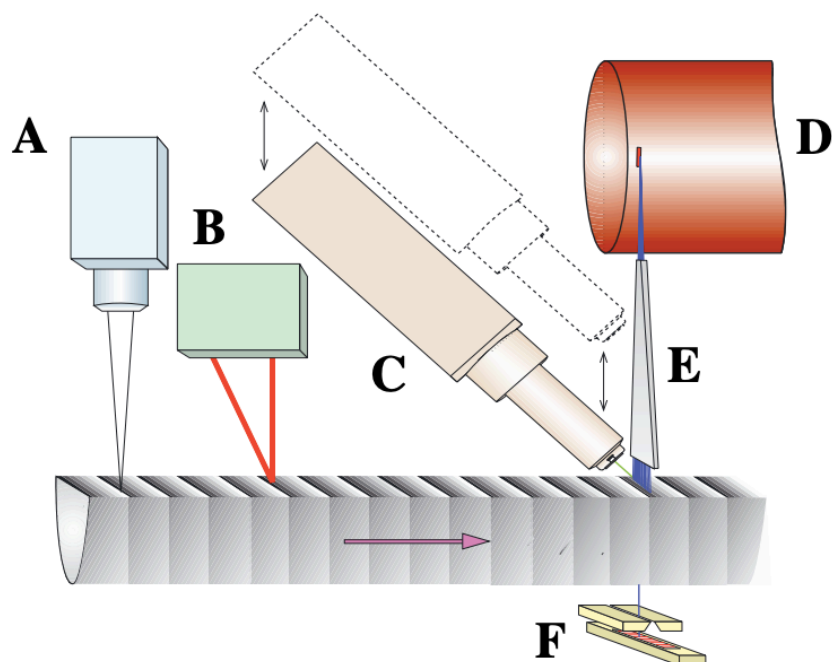
Gravity corer fra UiB slippes ut i vannet og synker ved hjelp av gravitasjonen, og kan ta opptil 5 meter lange sedimentkjerner (http 5). En ulempe med denne metoden er at de øverste lagene i kjernen kan ha blitt forstyrret eller mistet under prøvetakingen. Den andre metoden, multicorer, tar 4 prøver samtidig og i motsetning til en gravity corer forblir de øverste lagene uforstyrret (http 6).

3.2 Optiske bilder og røntgenbilder

Optiske bilder og røntgenbilder ble tatt ved å bruke en ITRAX kjerneskaner på Earthlab ved Universitet i Bergen, Institutt for geovitenskap.

Figur 7 viser komponentene i en ITRAX kjerneskaner. Komponent «A» viser det optiske kameraet som tar høyt oppløsende bilder av overflaten av den åpne sedimentkjernen. Optiske bilder viser både forskjeller i farger og teksten i kjernen. Mørke farger i sedimentkjernen indikerer høyere konsentrasjon av organisk materiale, og lyse farger indikerer mer minerogent materiale. Dersom sedimentkjernen inneholder store partikler, vil også dette kunne sees på det optiske bildet. Etter åpning av sedimentkjerner så kan kjernene begynne å oksidere når de kommer i kontakt med luften, dermed er det en stor fordel å ta optiske bilder av kjernen rett etter åpning slik at en kan studere de lenge etter at de har blitt tatt opp (Rothwell & Rack 2006).

Røntgenstrålinger blir sendt ut fra røntgenkilden «D» (Figur 7) hvor strålingen blir så fokusert ved hjelp av en stråleinnetning «E». Strålingens intensitet blir så plukket opp av et røntgenkamera «F» og registrert. Hvor mye av røntgenstrålingen som når frem til røntgenkameraet kommer an på tettheten av materialet (Croudace et al. 2006). Høyere tetthet vil vises med mørkere lag, og lavere tetthet med lyse lag.



Figur 7. Komponentene i en ITRAX kjerneskaner, hentet fra Croudace et al. (2006). (A) Optisk kamera, (B) Lasertrianguleringssystem som måler topografien i kjernen og sørger for at detektoren alltid måler fra lik avstand gjennom kjernen, (C) XRF detektor, (D) Røntgenkilde, (E) Strålingsinnretning og (F) Røntgenkamera. Pilen viser hvilken retning kjernen beveger seg.

3.3 Røntgenfluorescens (XRF)

X-ray fluorescens (XRF) ble utført ved å bruke en ITRAX kjerneskaner på Earthlab ved Universitet i Bergen, Institutt for geovitenskap.

Rothwell & Rack (2006) beskriver en XRF-analyse ved at kjernen blir utsatt for røntgenstråling, noe som fører til at elektronene blir kastet ut av sitt indre atomskall. De tomme plassene må så bli fylt, og dette skjer ved at elektroner fra det ytre skallet kommer og erstatter den tomme plassen. Overskuddsenergien, som kommer ved at elektronet ble kastet ut og energi blir tapt ved at elektroner i det ytre skallet måtte flytte plass, avgis som en puls av radiostråling. Elementer har en karakteristisk energi de slipper ut, og det er slik det er mulig å bestemme hvilket element som er til stede. I Figur 7 kan en se røntgendektoren markert med «C».

Det ble valgt å dele alle elementene på jern (Fe), da jern er det dominerende elementet med opptil flere størrelsesordener høyere verdier i XRF-analysen enn alle andre elementene. Dette ble gjort for å hindre at verdiene av de enkelte elementene ble maskert av jern. Videre ble det

valgt å normere alle elementverdiene mot 1 ved å dele de respektive elementene på deres største verdi. Røntgenfluorescens ble målt for hver millimeter nedover sedimentkjernen. Den resulterende datamengden (på millimeter oppløsning) gjorde at presentasjon av elementgrafene ble uoversiktlig. For å bedre kunne fange opp de generelle endringene i sedimentkjernene og for å kunne sammenligne XRF-dataene med datasettet fra Bucher (2020), ble det valgt å presentere alle data som gjennomsnittsdata i kontinuerlige 0,5 cm trinn nedover sedimentkjernen.

3.3.1 Inkoherens/Koherens (ink/koh)

Røntgenstrålingen som sedimentkjerne blir utsatt for, forteller også om inkoherens/koherens (ink/koh) forholdet i kjernen. Hvordan røntgenstrålingen blir spredt og reflektert tilbake avhenger av tettheten og dermed sammensetningen av sedimentet. Er materialet tykkere eller fastere så vil røntgenstrålingen bli mer spredt enn hvis materialet var tynt eller mindre fast (Croudace et al. 2006). Lave (ink/koh)-verdier vil indikere mer organisk materiale som har en mindre fasthet enn minerogent materiale eller høyere porevolum, og omvendt.

3.3.2 Elementanalyse og korrelasjon av XRF-data

Det ble foretatt en korrelasjonstest på elementene. Korrelasjon er en statistisk måling for å vurdere hvor mye to eller flere variabler henger sammen (http 7). Ved en korrelasjonstest så kan en enten få en positiv eller negativ korrelasjon, eller at det ikke eksisterer en korrelasjon i det hele tatt. En positiv korrelasjon viser en økning i begge variablene, mens en negativ korrelasjon viser til at variablene forholder seg motsatt av hverandre. Hvor mye variablene henger sammen gis ved korrelasjonskoeffisienten, og er mellom -1 og 1, hvor -1 er en negativ korrelasjon og 1 en positiv korrelasjon. Jo nærmere -1 eller 1 korrelasjonskoeffisienten er, jo mer henger variablene sammen (http 7). For denne korrelasjonstesten ble Excel sin dataanalyse med korrelasjon brukt.

Pearson korrelasjon (Pearson 1895) er valgt for å bestemme korrelasjonskoeffisienten «r» mellom elementene og sedimentdyp, og elementene seg imellom. I økonomien blir ofte korrelasjonskoeffisienter av $r < 0,3$ ansett som svake, mellom $r = 0,3$ og $r = 0,7$ som moderate og ved $r > 0,7$ som sterke korrelasjoner (Ratner 2009). Ved medisinsk bruk vil korrelasjonskoeffisienter av $r = 0,00$ til $0,10$ anses som ubetydelige, av $r = 0,10$ til $0,39$ som svake, av $r = 0,4$ til $0,69$ som moderate, av $r = 0,70$ til $0,89$ som sterke og av $r = 0,90$ til $1,00$ som veldig sterke korrelasjoner (Schober et al. 2018). I geokjemien er korrelasjonene ofte

maskert eller påvirket av utenforliggende verdier eller av uforutsigbare naturlige variasjoner; derfor har Howarth & Sinding-Larsen (1983) foreslått å anse en $r \leq 0,444$ som kritisk, og en $r \geq 0,444$ som signifikant. Og det er disse verdiene som blir brukt i denne oppgaven for å bestemme om korrelasjonskoeffisienten er signifikant eller ikke.

3.4 Magnetisk susceptibilitet

Måling av magnetisk susceptibilitet ble utført på Earthlab ved Universitet i Bergen, Institutt for geovitenskap. Magnetisk susceptibilitet vil si graden av hvor magnetisk et materiale er når det blir utsatt for et magnetfelt. Det magnetiske feltet blir styrket ved tilstedeværelsen av magnetiske materialer som mineralkorn, men også av forskjellige kornstørrelser, og motsatt dersom et materiale er diamagnetisk (Geotek 2016).

For målingen av magnetisk susceptibilitet så ble en GEOTEK Multi-Sensor Core Logger (MSCL) med punktsensor benyttet. Det er valgt å presentere dataen som gjennomsnittsdata med 0,2 cm trinn.

3.5 Datering

Dateringen som blir gjort bygger videre på dateringen av Bucher (2020). Han brukte dateringstilnærmingen gjort av Paetzel & Dale (2010), som bruker først og fremst korrelasjonen mellom nedbørsmengden og materiale tilført ved resulterende avrenning fra land og avsatt i sedimentene. I tillegg tilordner Paetzel & Dale (2010) enkelte sedimentlag til dokumenterte historiske hendelser. Bucher (2020) brukte i hans datering av sedimentene i Arnafjordsystemet skredet fra 1811 som dateringshorisont. Ved å ha en eller flere dateringshorisonter er det mulig å beregne den lineære sedimentasjonsraten mellom disse horisontene. Formelen Bucher (2020) brukte er:

$$\text{Sedimentasjons rate (SR)} = \frac{\text{Sediment tykkelse over et definert lag (cm)}}{\text{Tid siden hendelsen frem til i dag (år)}}$$

Videre bekreftet han dateringen ved å sammenligne likheter av toppen fra (inkoherens/koherens)-grafene med tilsvarende, karakteristiske nedbørstopper fra de siste 100

årene, og brukte likhetsbildet til å bekrefte av den lineære sedimentasjonsraten, men uten å tilordne toppene til hverandre.

Likhetsbildet fra Bucher (2020) brukes her som grunnlag for å tilordne like topper i nedbørsgrafene og (inkoherens/koherens)-grafene til hverandre og dermed beregne detaljerte sedimentasjonsrater mellom disse toppene, som stort sett ligger mellom fem og ti år fra hverandre. Dermed vil det ikke bare bli mulig å beregne sedimentasjonsraten mellom de assosierte toppene, men i tillegg å bestemme årstall på endringer i sediment.

4 Resultater

4.1 Prøvetaking

Tabell 3 viser kjernene med deres navn, lengde- og breddegrad, på hvilken dybde de ble tatt og hvor lange de er.

Tabell 3. Navnene som blir brukt på de tre kjernene, på hvilken lengde- og breddegrad de ble tatt, på hvilket dyp og hvor lange kjernene er. Informasjonen er fra Universitet i Bergen ved Institutt for geovitenskap.

| Navn | Kjerne | Lengdegrad | Breddegrad | Dybde (m) | Lengde (m) |
|-------------------------|---------------|-------------|-------------|-----------|------------|
| GC06 Arnafjordbassenget | GS20-229-06GC | 61° 01.147' | 06° 23.798' | 100 | 1,26 |
| MC04 Indrefjord | GS20-229-04MC | 61° 00.556' | 06° 21.746' | 68 | 0,30 |
| MC05 Framfjord | GS20-229-05MC | 61° 00.757' | 06° 24.195' | 82 | 0,31 |

Figur 8 viser hvor de ulike kjerne ble tatt, med deres kjernenavn, navnet på fjorden og når prøvetakingen ble gjennomført. Begge CTD-profiler som er omtalt i Kapittel 2.1 ble tatt i Arnafjordbassenget på samme lokalitet som GC06.



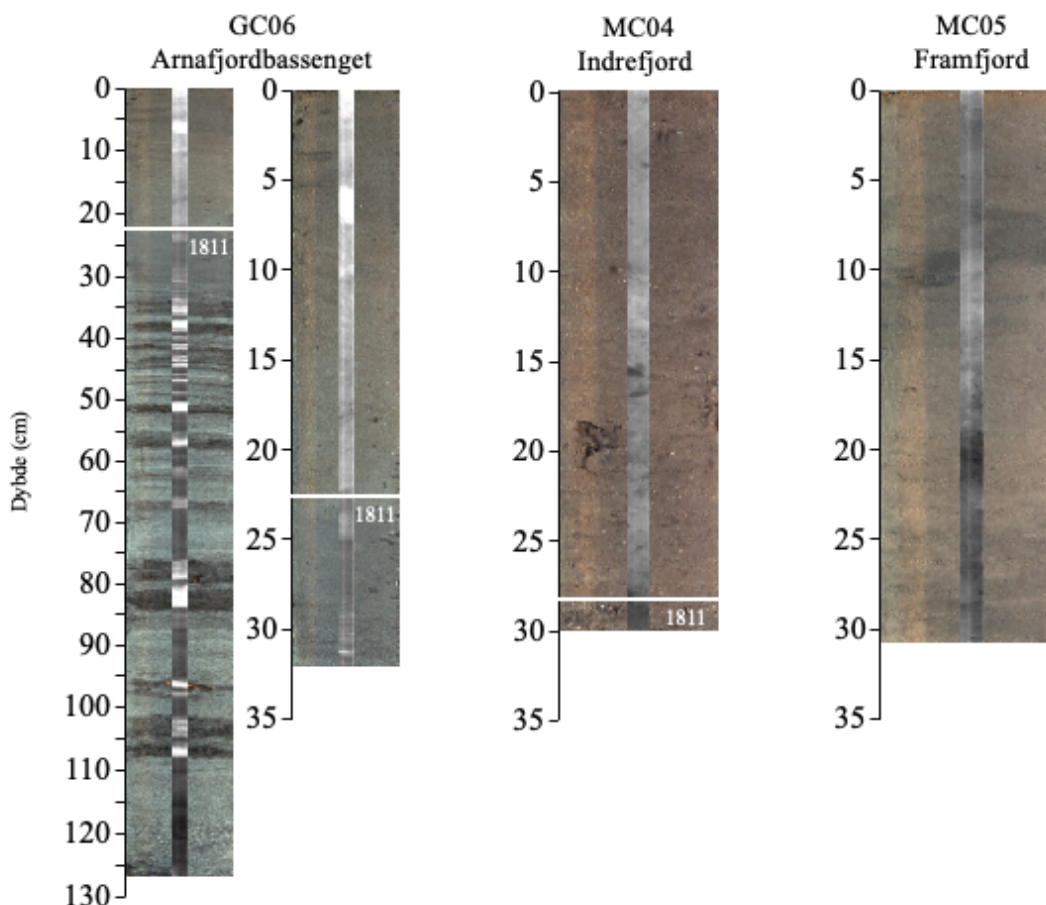
Figur 8. Posisjonen til hvor de tre sedimentkjernene har blitt tatt i fjordsystemet, kjernenavn og navn på fjorden samt dato for prøvetaking. Bildet hentet fra Norge i Bilder ([http 8](http://8)).

4.2 Optiske bilder og røntgenbilder

I kerne GC06 fra Arnafjordbassenget (Figur 9) viser det optiske bildet skredmateriale mellom 126 cm og 22,5 cm sedimentdyp, som tidligere er beskrevet og tolket som avsetninger fra skredet fra 1811 av Bucher (2020). Det er tydelig vekslende lag med organisk rikt sediment (mørke lag) eller minerogent rikt sediment (lyse lag). Dette sees igjen i røntgenbildet av kjernen som igjen viser tydelig vekslende lag, her med lyse lag som viser lavere tetthet og indikerer mer organisk materiale og mørke lag som viser høyere tetthet og indikerer mer minerogent materiale. Videre opp fra 22,5 cm blir det mindre variasjoner i det optiske bildet og røntgenbildet. Fra 7 cm til 5 cm og i de øvre 2,5 cm indikerer røntgenbildet at tettheten minker. Denne endringen kommer ikke frem med det optiske bildet. På bakgrunn av interessen for miljøendringene de siste 100 årene, samt ønsket om å sammenligne elementsignaler i alle tre kjernene er det videre valgt å fokusere på de øvre 32 cm i kerne GC06 fra Arnafjordbassenget. Legg derfor merke til at bildet og røntgenbildet av de øvre 32 cm av sedimentkjernen vises forstørret til høyre for hele den 126 cm lange kjernen fra Arnafjordbassenget i Figur 9.

Fra 30 cm til 28 cm i kjerne MC04 fra Indrefjorden (Figur 9) kan en se et grovkornet silt- og sandlag. Dette laget er tolket til å være skredtoppen av skredet fra 1811 skredet (Bucher 2020). I det optiske bildet kan en se at sedimentene her er grovere, og røntgenbildet viser at det her er en høyere tetthet. Resterende del av kjernen fra 28 cm til 0 cm, viser lite variasjon både i det optiske bildet og i røntgenbildet. Det er stedvis en svak økning eller minking i tettheten, men sedimentene viser ingen markante kontraster.

Kjerne MC05 fra Framfjorden (Figur 9) viser mindre variasjon enn de andre kjernene. I røntgenbildet er det høyest tetthet fra 22 cm til 19 cm, som ikke vises som en endring i det optiske bildet. Ved 11 cm til 6 cm i det optiske bildet er det noe mørkere farge på sedimentet, men dette kommer ikke godt frem ved røntgenbildet.



Figur 9. Resultater av optiske bilder og røntgenbilde med dybdeakse for GC06 fra Arnafjordbassenget, MC04 fra Indrefjorden og MC05 fra Framfjorden. Hvit linje gjennom det optiske bildet og røntgenbildet i GC06 og MC04 viser det som er tolket av Bucher (2020) til å være skredtoppen fra skredet i 1811.

4.3 Røntgenfluorescens (XRF)

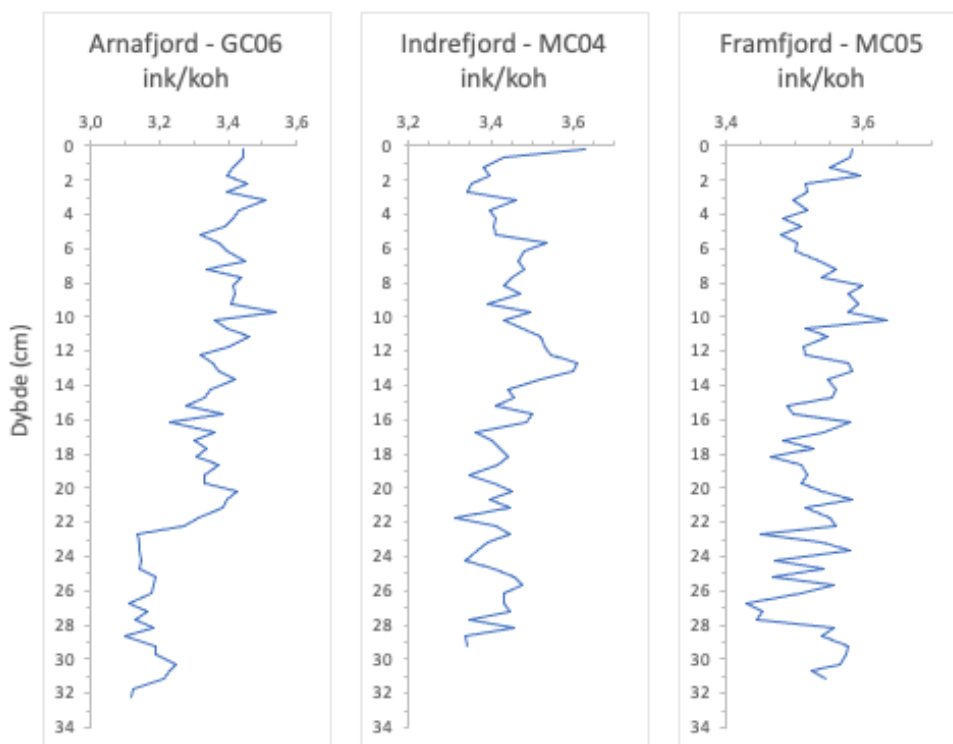
Resultatene (rådata og grafer) fra elementanalysen med XRF er vist i sin helhet i Appendiks A.

4.3.1 Inkoherens og koherens (ink/koh)

Figur 10 viser resultater med inkoherens/koherens (ink/koh) fra XRF-analysen. Grafen for sedimentkjerne GC06 viser lav (ink/koh) $\approx 3,1$ fra 32,2 cm til 23 cm kjernedyp, som indikerer høyere konsentrasjoner av minerogent materiale. Fra 23 cm og oppover kjernen blir det en rask økning til (ink/koh) $\approx 3,3$ før konsentrasjonen får en ytterligere svak økning til (ink/koh) $\approx 3,4$ fra 10 cm sedimentdyp og deretter holder seg stabil opp mot sedimentoverflaten.

Konsentrasjonen er stabil med mindre fluktasjoner rundt (ink/koh) $\approx 3,4$ mellom fra 29 cm og 15 cm i kjernedyp i kjerne MC04. Videre oppover kjernen blir det en rask økning til (ink/koh) $\approx 3,6$ opp mot 13 cm kjernedyp før konsentrasjonen minker igjen til (ink/koh) $\approx 3,4$ fra 10 cm og opp mot 1 cm kjernedyp. Konsentrasjonen øker igjen til (ink/koh) $\approx 3,6$ over den øverste centimeteren.

Grafen til kjerne MC05 viser jevnt økende nivåer av de laveste verdiene av (ink/koh) $\approx 3,4$ til 3,5 med større svingninger mellom 31 cm oppover mot 10 cm kjernedyp. Fra maksimumsverdien av (ink/koh) $\approx 3,65$ ved 10 cm minker verdiene jevnt til (ink/koh) $\approx 3,45$ ved 6 cm kjernedyp, før de øker igjen til verdier av (ink/koh) $\approx 3,6$ over de øverste 2 cm av kjernen.



Figur 10. Resultat med inkohereans/koherens fra XRF analysen for de tre kjernene mot sedimentdyp i cm.

4.3.2 Elementanalyse og korrelasjon av XRF-data

I denne delen vises resultater fra XRF-elementanalysen og korrelasjonstesten for elementdata. Fullstendig oversikt over rådata og normerte data fra XRF-elementanalysen samt tilhørende grafer finnes i Appendiks A, og den fullstendige korrelasjonstesten i Appendiks C.

Pearson korrelasjonstest

Resultatene av Pearson korrelasjonstesten er illustrert i Tabell 4 og Tabell 5. Samtlige korrelasjoner finnes i Appendiks C. Legg merke til at alle elementsymboler i dette avsnittet om korrelasjonstesten referer til elementet som er korrigert for jern. Det vil si at for eksempel «Br» står for «Br/Fe», noe som gjør teksten og tabellen mer leselige.

Tabell 4 viser korrelasjon mellom elementene og sedimentdyp i tall og ord. Elementet Br er det eneste elementet som forholder seg likt i alle tre fjordbassenger ved at det øker signifikant mot sedimentoverflaten i Arnafjordbassenget, Indrefjorden og Framfjorden.

Sedimentene i Arnafjordbassenget viser de fleste signifikante korrelasjonene der korrelasjonskoeffisientene for Cl, Sr og Zr øker signifikant i tillegg til og parallelt med Br mot

sedimentoverflaten, mens elementene Si og K forholder seg motsatt og minker mot sedimentoverflaten.

Sedimentene i Indrefjorden viser ingen signifikante korrelasjoner mot sedimentoverflaten, bortsett fra omtalte Br:Dyp. Framfjorden viser i tillegg til økende Br mot sedimentoverflaten en parallell minking av S og Cl, mens K øker mot sedimentoverflaten.

Tabell 4. Resultat av korrelasjonstest med dyp mot element. Korrelasjonskoeffisienten er gitt for Arnafjordsbassenget, Indrefjorden og Framfjorden. Tabellen gir også forklaring til endring i elementet som har ført til korrelasjonen.

| Korrelasjon | Arnafjord | Indrefjord | Framfjord | Endring |
|-------------|-----------|------------|-----------|--|
| S:Dyp | | | 0,5 | Fast svovel minker mot overflaten |
| Br:Dyp | -0,8 | -0,6 | -0,6 | Brom minker mot dyp/øker mot overflaten |
| Cl:Dyp | -0,8 | | 0,5 | Klor øker mot overflaten (Arnafjord), klor minker mot overflaten (Framfjord) |
| Sr:Dyp | -0,7 | | | Strontium øker mot overflaten |
| Zr:Dyp | -0,6 | | | Zirkonium øker mot overflaten |
| K:Dyp | 0,7 | | -0,5 | Kalsium minker mot overflaten (Arnafjord), kalsium øker mot overflaten (Framfjord) |

Tabell 5 viser korrelasjonene ved elementene seg imellom, der positive korrelasjonskoeffisienter viser at elementene varierer like med hverandre, og negative korrelasjonskoeffisienter at elementer oppfører seg motsatt fra hverandre.

Elementene Si og K korrelerer positivt med hverandre i alle tre kjerner, mens elementene Ba og Ce korrelerer negativt med hverandre i de tre kjernene.

Igjen er det i Arnafjordbassenget det finnes de fleste signifikante korrelasjoner med positive korrelasjoner mellom Br, Cl, Sr, og Zr, og negative korrelasjoner mellom disse elementene og Si og K.

Framfjorden og Indrefjorden viser tydelig færre korrelasjoner enn Arnafjordbassenget. Ved siden av de felles korrelasjonene i alle tre kjerner finnes det i Framfjorden positiv korrelasjon mellom Si:K og S:Cl, samt er negativ korrelasjon mellom K og Cl, og i Indrefjorden en positiv korrelasjon mellom Br og Cl.

Tabell 5. Resultat av korrelasjonstest mellom element mot element. De ulike elementene som viser korrelasjon, og korrelasjonskoeffisienten ved Arnafjordsbassenget, Indrefjorden og Framfjorden. Positiv korrelasjonskoeffisient viser til at elementene øker/minker samtidig, negativ korrelasjonskoeffisient viser at elementene oppfører seg motsatt av hverandre.

| Korrelasjon | Arnafjord | Indrefjord | Framfjord |
|-------------|-----------|------------|-----------|
| Si:K | 0,6 | 0,5 | 0,5 |
| Si:Cl | -0,5 | | |
| Cl:Br | 0,8 | 0,5 | |
| S:Cl | | | 0,5 |
| Cl:K | -0,8 | | -0,5 |
| Cl:Sr | 0,7 | | |
| Cl:Zr | 0,6 | | |
| K:Br | -0,7 | | |
| K:Sr | -0,5 | | |
| K:Zr | -0,5 | | |
| Br:Sr | 0,7 | | |
| Br:Zr | 0,5 | | |
| Ba:Ce | -0,6 | -0,6 | -0,7 |
| Sr:Zr | 0,445 | | |

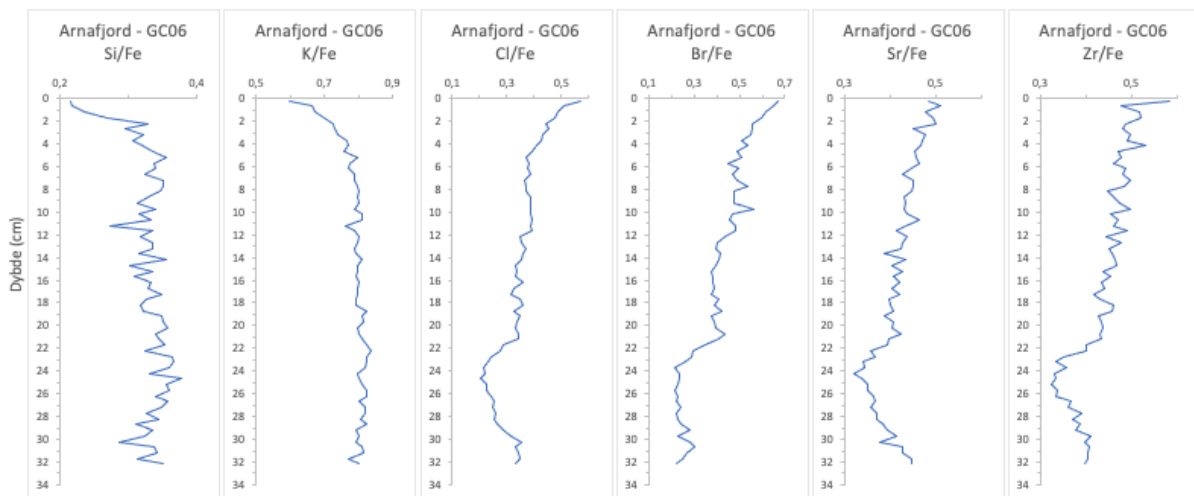
XRF Elementanalyse

Figur 11 og 12 (Arnafjordsbassenget), Figur 13 (Indrefjorden) og Figur 14 (Framfjorden) viser grafene av XRF-analysen for alle elementene som viser signifikant korrelasjon mot dyp eller mot hverandre.

I Arnafjordsbassenget oppfører silisium (Si/Fe) og kalsium (K/Fe) (Figur 11) seg nokså likt, som også er vist med korrelasjonskoeffisient på $r = 0,6$ (Tabell 5). Silisium som har mer svingninger enn kalsium, starter ved 32,2 cm med en verdi på $\approx 0,32$. Mellom 31 cm og 25 cm kjernedyp i silisium så er det en svak økning fra $\approx 0,3$ til $\approx 0,37$, etterfølgende av en svak minking frem til 19 cm hvor det blir en stabil konsentrasjon på $\approx 0,32$ som varer frem til 5 cm. Ved 11 cm er det en nedgangstopp som en kan se både i silisium og kalsium, men er mest kraftig i silisium, hvor konsentrasjonen ved nedgangstoppen er $\approx 0,26$ i silisium og $\approx 0,75$ i kalsium. Konsentrasjonen av kalsium er stabil med en minimal minking mellom 32,2 cm til 5 cm kjernedyp hvor konsentrasjonen ligger på $\approx 0,8$. I både silisium og kalsium så minker konsentrasjonen fra 5 cm kjernedyp, og begge har de laveste verdiene ved sedimentoverflaten hvor silisium ligger på $\approx 0,21$ og kalsium $\approx 0,6$.

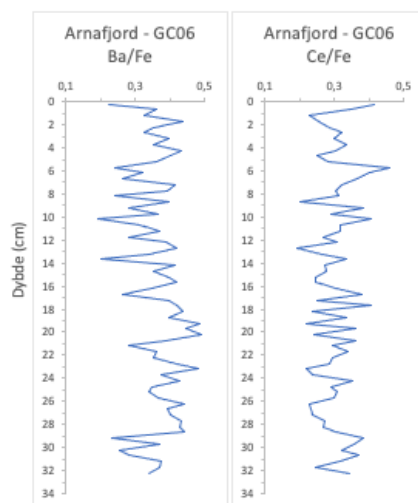
Klor (Cl/Fe), brom (Br/Fe), strontium (Sr/Fe) og zirkon (Zr/Fe) (Figur 11) viser alle samme trend. Ved alle elementene så blir det først en minking i konsentrasjonen fra 32,2 cm frem til ≈ 24 cm kjernedyp. Her viser alle elementene sin laveste konsentrasjon med klor og brom på

$\approx 0,2$, og strontium og zirkon på $\approx 0,31$. Heretter øker konsentrasjonen, med klor og brom så øker konsentrasjonen for å så stabilisere seg på $\approx 0,32$ mellom 21 cm til 12 cm. Fra 12 cm til 5 cm i klor og brom øker konsentrasjonen igjen, hvor klor stabiliser seg på $\approx 0,4$ mens brom viser en gradvis økning som har sin høyeste verdi ved $\approx 0,49$. Klor og brom sin konsentrasjon stiger fra 5 cm og opp til sedimentoverflaten hvor begge har sin maksimumsverdi, i klor $\approx 0,53$ og i brom $\approx 0,69$. Strontium og zirkon har en stabil økning fra minimumskonsentrasjonen ved 24 cm, og likt som klor og brom, så har de sin maksimumsverdi ved sedimentoverflaten med strontium på $\approx 0,5$ og zirkon på $\approx 0,69$.



Figur 11. Elementer i Arnafjordbassenget som viste en korrelasjon mot dyp eller seg imellom fra Tabell 5. Fra venstre; silisium (Si/Fe) og kalium (K/Fe). Deretter videre mot høyre: klor (Cl/Fe), brom (Br/Fe), strontium (Sr/Fe) og zirkon (Zr/Fe).

Barium (Ba/Fe) og cerium (Ce/Fe) i Arnafjordbassenget (Figur 12), oppfører seg ulikt med hverandre. Dette ble vist med korrelasjonskoeffisienten på $r = -0,6$ i Tabell 5. Begge elementer viser fluktuasjoner. Barium synker i konsentrasjonen fra 32,2 cm frem til 14 cm hvor verdien er på sitt høyeste ved $\approx 0,32$, og sitt laveste ved $\approx 0,2$. Deretter så stabiliserer barium seg frem til 6 cm, hvor verdien er gjennomsnittlig $\approx 0,31$. Fra 6 cm til sedimentoverflaten så øker konsentrasjonen til et nytt nivå hvor den gjennomsnittlige konsentrasjonen er $\approx 0,32$, med lavest verdi ved sedimentoverflaten på $\approx 0,21$. Cerium holder seg mer stabilt gjennom hele kjernen, men fortsatt store fluktuasjoner. Den gjennomsnittlige verdien for cerium ligger på $\approx 0,3$, med økning mot sedimentoverflaten hvor konsentrasjonen er $\approx 0,41$.

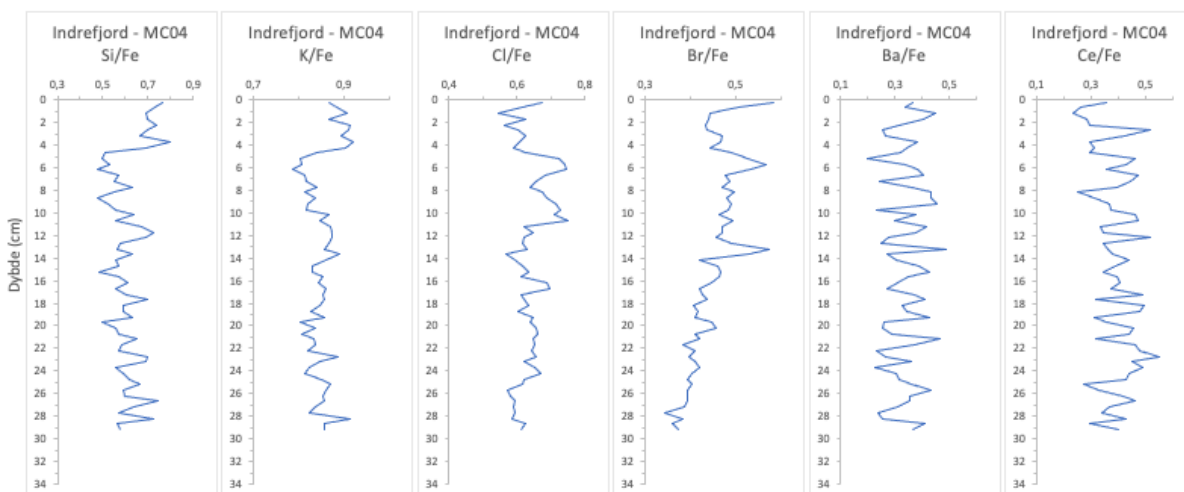


Figur 12. Elementer fra Arnafjordbassenget som viste en negativ korrelasjon seg imellom fra Tabell 5. Til venstre vises graf for barium (Ba/Fe) og til høyre cerium (Ce/Fe).

Silisium og kalium oppfører seg omtrent likt i Indrefjorden (Figur 13), med korrelasjonskoeffisient på $r = 0,5$ (Tabell 5). Begge elementene viser en svak nedgang i konsentrasjonen fra 32,2 cm til 5 cm, hvor verdiene går fra $\approx 0,65$ til $\approx 0,5$ i silisium og fra $\approx 0,91$ til $\approx 0,8$ i kalium. Fra 5 cm blir det en relativ rask økning, som stabiliserer seg ved 4 cm kjernedyp, konsentrasjon her er $\approx 0,71$ i silisium og $\approx 0,9$ i kalium.

Klor og blom oppfører seg noe likt (Figur 13), med en korrelasjonskoeffisient $r = 0,5$ (Tabell 5). Klor er relativt stabil mellom 32,2 cm til 11 cm, men med en liten topp ved 15 cm. Konsentrasjonen er $\approx 0,61$, og toppen har en verdi på $\approx 0,7$. I brom så er det en økning mellom 32,2 cm til 5 cm kjernedyp i konsentrasjonen fra $\approx 0,35$ til $\approx 0,49$, med en topp ved 13 cm på $\approx 0,59$. I klor, mellom 11 cm og 4 cm så er det to større topper hvor begge har en verdi på $\approx 0,75$. Den øvre toppen ved 6 cm i klor finner en også i brom ved 6 cm, som har en verdi på $\approx 0,59$. Heretter oppfører elementene seg likt ved at de går tilbake til et noe lavere verdi enn før toppene på $\approx 0,6$ i klor og $\approx 0,65$ i brom, før begge øker mot sedimentoverflaten og hvor klor $\approx 0,65$ og brom $\approx 0,59$.

Barium og cerium i Indrefjorden oppfører seg, som i Arnafjordbassenget, motsatt av hverandre. Grafene til elementene i Figur 13 viser at begge elementene har store svingninger, men holder seg nokså stabilt på gjennomsnittlig $\approx 0,31$ i barium, og cerium på gjennomsnittlig $\approx 0,4$ med noe minimal minking.

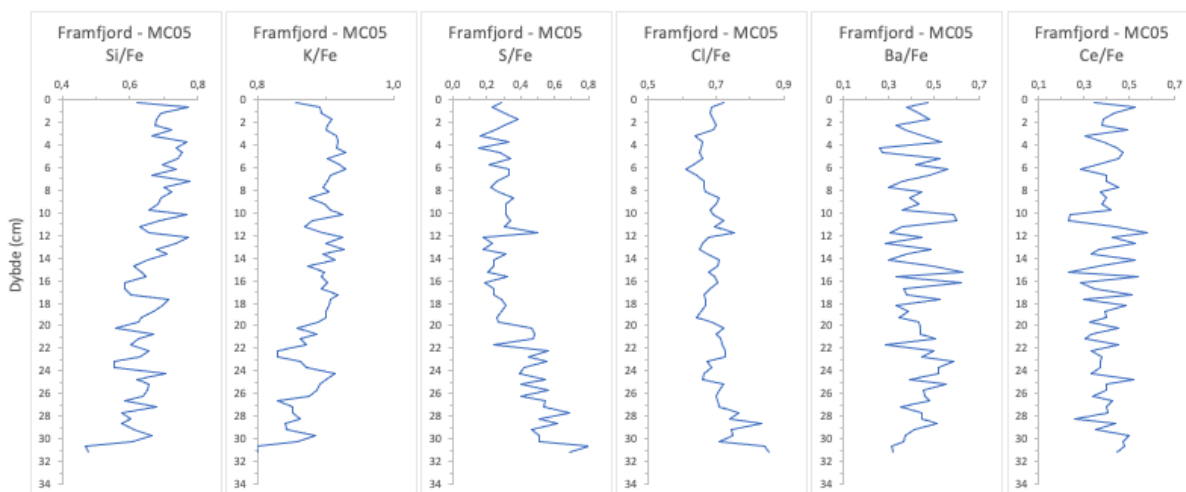


Figur 13. Elementer i Indrefjorden som viste en korrelasjon mot dyp eller seg imellom. Fra venstre; silisium (Si/Fe) og kalium (K/Fe). Deretter videre mot høyre: klor (Cl/Fe) og brom (Br/Fe). Deretter videre mot høyre: barium (Ba/Fe) og cerium (Ce/Fe).

Silisium (Si/Fe) og kalium (K/Fe) i Framfjorden har en korrelasjonskoeffisient på $r = 0,5$ (Tabell 5), og som en kan se i Figur 14, oppfører seg likt. Elementene øker mellom 32,2 cm og 6 cm, hvor konsentrasjonen øker fra $\approx 0,45$ til $\approx 0,59$ i silisium og fra $\approx 0,8$ til $\approx 0,92$ i kalium. Heretter fortsetter silisium den samme økningen opp til 1 cm hvor verdien er $\approx 0,78$, før konsentrasjonen syner opp mot sedimentoverflaten og havner på $\approx 0,61$. Kalium derimot starter å minke i konsentrasjonen allerede fra 6 cm, hvor verdien ved sedimentoverflaten er $\approx 0,85$.

Svovel (S/Fe) og klor (Cl/Fe) viser i Tabell 5 med en korrelasjonskoeffisient på $r = 0,5$, samt i Figur 14 at de oppfører seg likt. Begge elementene minker i konsentrasjonen mellom 32,2 cm og 20 cm, hvor svovel går fra å ha en konsentrasjon på $\approx 0,88$ til $\approx 0,65$, og klor fra $\approx 0,8$ til $\approx 0,25$. Fra 20 cm opp til sedimentoverflaten viser svovel og klor en stabil konsentrasjon på $\approx 0,3$ og $\approx 0,66$. Begge elementene har likevel en mindre topp ved 12 cm som gir en verdi på $\approx 0,5$ i svovel og $\approx 0,71$ i klor, og hvor toppen vises kraftigere i svovel enn i klor.

Barium (Ba/Fe) og cerium (Ce/Fe) i Framfjorden oppfører seg likt som i Arnafjordbassenget og Indrefjorden, ved at de oppfører seg ulikt fra hverandre. Elementene viser i Figur 14 en stabil konsentrasjon, men med mye fluktuasjoner. Barium har en gjennomsnittskonsentrasjon på $\approx 0,44$ og cerium på $\approx 0,4$.



Figur 14. Elementene i Framfjorden som viser en korrelasjon mot dyp eller seg imellom. Fra venstre; silisium (Si/Fe) og kalium (K/Fe). Deretter videre mot høyre: svovel (S/Fe) og klor (Cl/Fe). Deretter videre mot høyre: barium (Ba/Fe) og cerium (Ce/Fe).

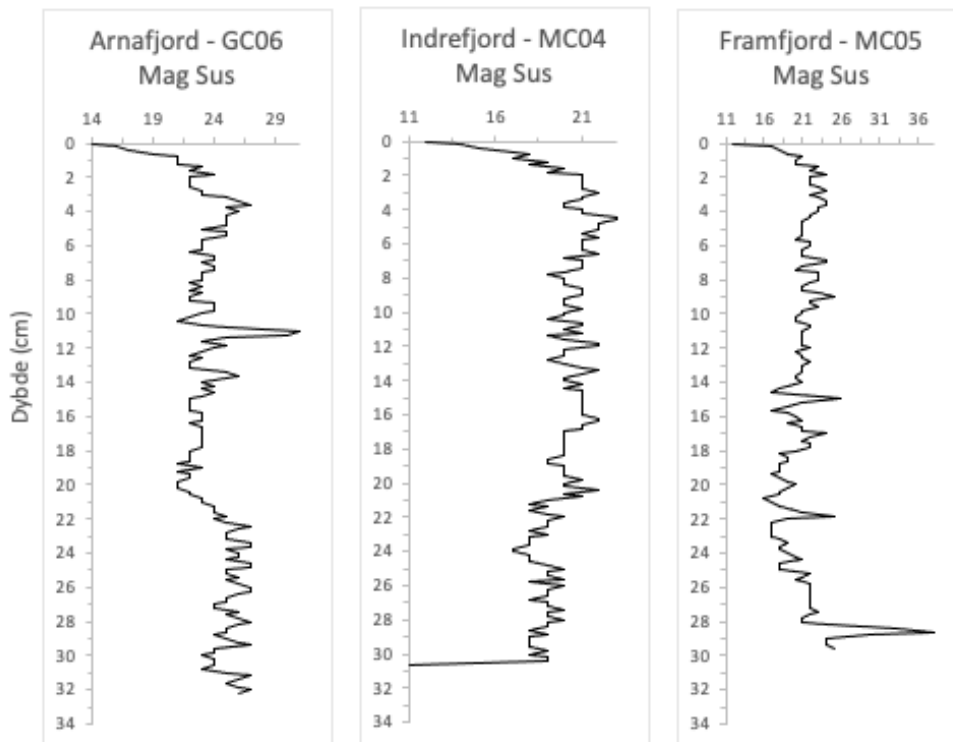
4.4 Magnetisk susceptibilitet

Resultatene for magnetisk susceptibilitet vises i Figur 15 for de tre sedimentkjernene.

Ved den magnetiske susceptibiliteten kan en se det motsatte av det som en ser i (ink/koh)-analysen i Figur 10. Økt mengde organisk materiale vil gi lave utslag mens økt minerogent (og mer magnetisk) materiale vil gi høyere utslag på den magnetiske susceptibiliteten. Dette vises spesielt i GC06 kjernen, hvor (ink/koh)-grafene viste en nedgang fra 32,2 cm til 23 cm, mens den magnetiske susceptibiliteten viser en økt magnetisk susceptibilitet i samme område med verdier på $\approx 26,5$. Etter 23 cm så synker konsentrasjonen og stabiliserer seg ved $\approx 22,5$. Ved 11 cm kjernedyp er det en topp med verdi på $\approx 31,5$, som er den høyeste verdien gjennom hele kjernen. Etter toppen så synker konsentrasjonen og ligger på samme verdier som før toppen, $\approx 22,5$, og det blir en gradvis økning opp til $\approx 26,5$ ved 3 cm kjernedyp. De øvre cm i kjernen blir synker verdiene, og en får de laveste verdiene ved sedimentoverflaten med hvor konsentrasjonen er på ≈ 14 .

Kjerne MC04 Indrefjorden viser en nedgang ved 30,5 cm som skyldes at kjernelengden tar slutt, og det er ukjent i hva som skyldes den høye verdien i MC05 Framfjorden ved 28,5 cm. I kjerne MC04 Indrefjorden, er det en gradvis økning med svingninger i konsentrasjonen hvor verdiene går fra $\approx 18,5$ til ≈ 21 mellom 31 cm til 2 cm. De øvre cm blir det så en minking i konsentrasjonen, hvor en får den lavest konsentrasjon ved sedimentoverflaten med ≈ 12 . I kjerne MC05 fra Framfjorden, så har en de høyeste konsentrasjonene med $\approx 38,5$ ved 29 cm

kjernedyp, hvor konsentrasjonen heretter minker frem til 23 cm hvor konsentrasjonen er ≈ 18 . Mellom 23 cm frem til 2 cm er det en svak økning fra ≈ 18 til ≈ 23 , med noen topper med høyere konsentrasjoner. De øvre cm i kjernen samt sedimentoverflaten viser her samme trend som de to tidligere omtalte kjernene, ved at konsentrasjonen minker, og en får de laveste verdiene ved sedimentoverflaten med ≈ 12 .



Figur 15. Resultat ved magnetisk susceptibilitet vist for alle tre kjernene. Grafene har en dybdeskala med cm som enhet.

4.5 Datering

Med dateringen ble topper og bunner i (ink/koh)-grafene assosiert til lignende topper eller bunner i nedbørsgrafen. Alle tre kjernene ble satt opp mot nedbørsgraf som viste 5 år gjennomsnitt, da den passet best til den lineære sedimentasjonsraten av rundt 0,1 cm/år i alle tre kjernene, som ble utarbeidet av Bucher (2020). Dermed vil prøvene på 0,5 cm tilsvare fem år i gjennomsnitt. Dateringen og resultatet for dateringen kan sees for hver kjerne i Figur 16 (GC06 Arnafjordbassenget), Figur 17 (MC04 Indrefjorden) og Figur 18 (MC05 Framfjorden).

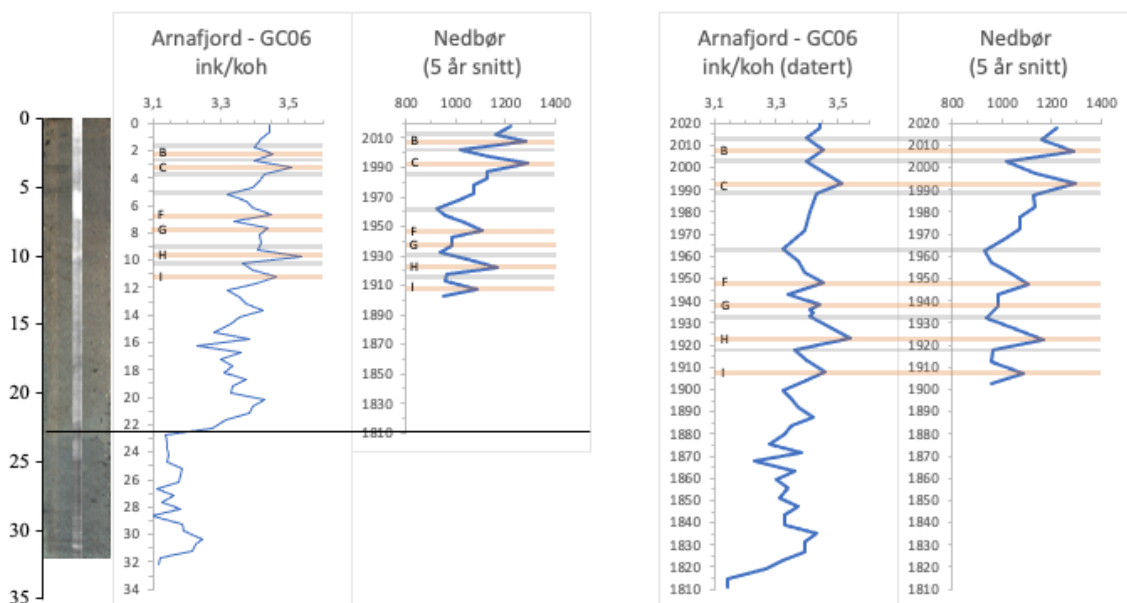
Tolkningen av Bucher (2020) om at kjernene GC06 (Arnafjordbassenget) og MC04 (Indrefjorden) viser toppen av skredmaterialet fra skredet i 1811 er videreført her, og brukt

som dateringshorisont. Ved kjerne MC05 (Framfjorden), hvor det ikke er noen tydelig skredtopp, er 1811 satt til det siste punktet i kjernen for å kunne få en minimumdatering tilbake til 1811 slik som kjerne GC06 og MC04. Denne minimumsdateringen ligger ca. 2 cm grunnere i sedimentkjernen enn posisjonen av den ekstrapolerte 1811-dateringen av Bucher (2020) og resulterer dermed i en litt lavere sedimentasjonsrate enn opprinnelig foreslått.

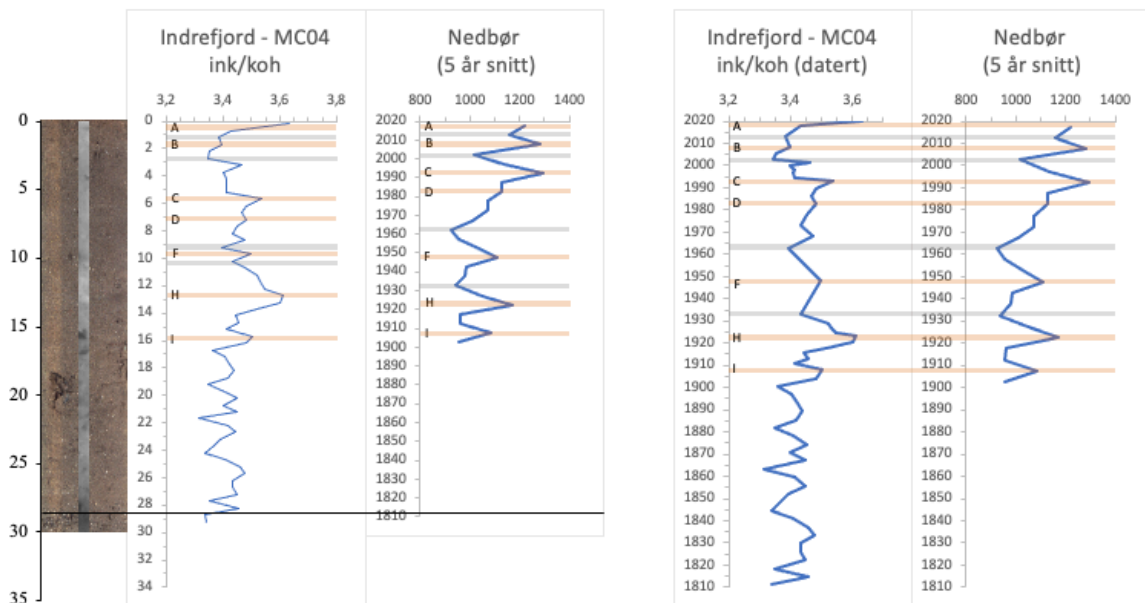
Når topper og bunner i (ink/koh)-grafene ble tildelt lignende topper og bunner i nedbørsgrafen, ble dybden satt til årstallet av hver gitt topp eller bunn i nedbørsgrafen. Utrekningen av sedimentasjonsraten mellom toppene, eksempel A og B, var som følgende:

$$\text{Sedimentasjonsrate} = \frac{\text{Antall år mellom assosierte topper eller bunner}}{\text{Antall dybder mellom assosierte topper eller bunner}}$$

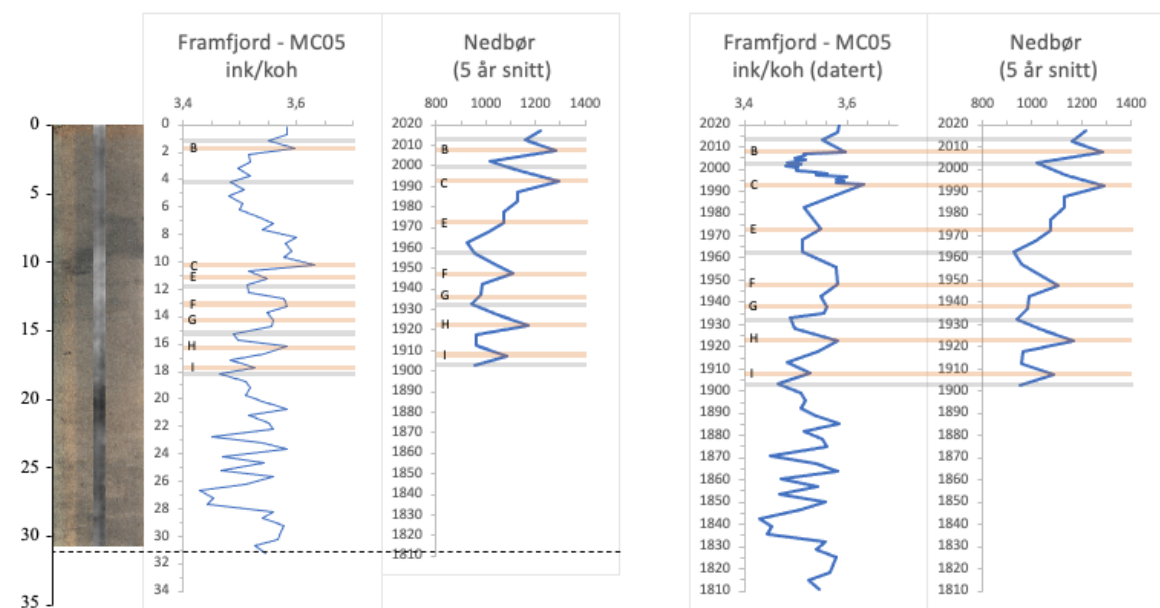
Denne utregningen var lik for alle tre kjerner. Det øverste punktet, sedimentoverflaten, ble satt til kalenderåret 2020 i alle kjernene. Utrekningen for alle tre kjernene vises i Appendiks B. I Figurene 16, 17 og 18 er toppene markert med bokstavene A-I. Ved dateringen av de tre kjernene så er ikke alle nedbørstopperne blitt tildelt en dybde ved (ink/koh)-grafene, dermed vil Figurene 16, 17 og 18 ikke alltid inneholde alle bokstavene.



Figur 16. Dateringen av kjerne GC06 fra Arnafjordbassengeet. Svart linje viser dateringshorisonten fra skredet i 1811. (Ink/koh)- og nedbørstopper er markert med oransje farge, og nedgangene med grå farge. Grafene til venstre viser de assosierte toppene markert med bokstavene A-I, og grafene til høyre viser resultatet etter omregning dra dybde til tid samt de assosierte toppene med bokstaver.



Figur 17. Datering av kjerne MC04 fra Indrefjorden. Svart linje viser til dateringshorisonten fra 1811 skredet. (Ink/koh)- og nedbørstopper er markert med oransje farge, og nedgangene med grå farge. Grafene til venstre viser de assosierte toppene markert med bokstavene A-I, og grafene til høyre viser resultatet etter omregning fra dybde til tid samt de assosierte toppene med bokstaver.



Figur 18. Datering av kjerne MC05 fra Framfjorden. Svart stiplet linje er satt ved siste punkt i ink/koh graf, og satt til 1811. (Ink/koh)- og nedbørstopper er markert med oransje farge, og nedganger med grå farge. Til venstre vises de assosierte toppene markert med bokstavene A-I, og grafene til høyre viser resultatet etter omregning fra dybde til tid samt de assosierte toppene med bokstaver.

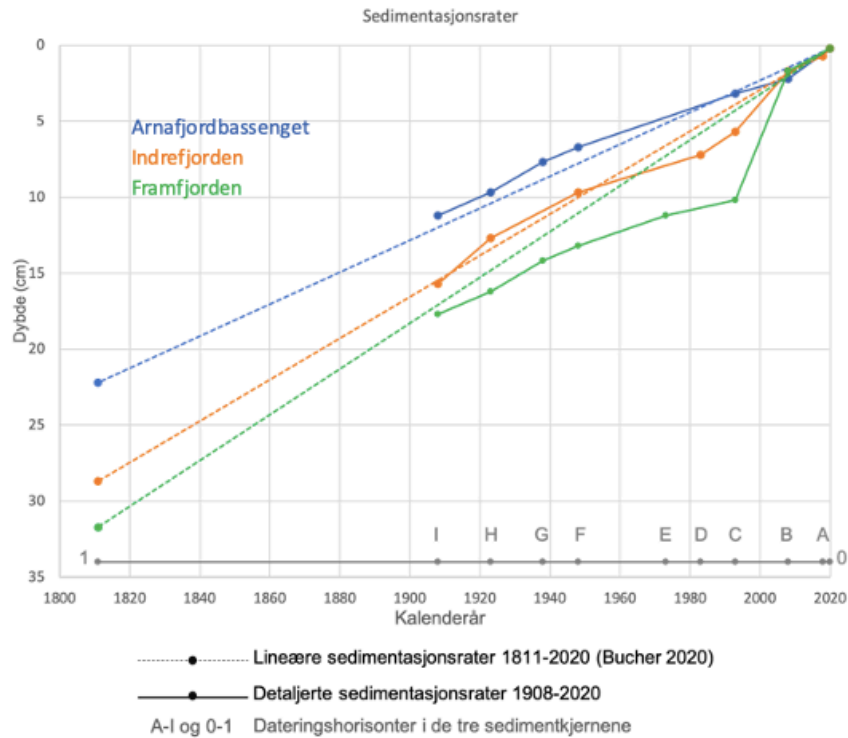
5 Diskusjon

5.1 Datering

Alle grafene som blir vist i diskusjonsdelen vises med tidsskalaen fra dateringen som er blitt gjennomført, og kan sees i sin helhet i Appendiks B. Som nevnt tidligere så var det valgt å bruke nedbørsgraf med 5 års gjennomsnitt, da den passet best til den lineære sedimentasjonsraten på rundt 0,1 cm/år og elementene som har 0,5 cm trinn (Bucher 2020). Med den lineære dateringen av Bucher (2020) tar man utgangspunkt i at det alltid blir avsatt 0,1 cm per år i løpet av over 200 år, noe som er urealistisk. I perioder har det trolig blitt avsatt både mer og mindre enn de antatte 0,1 cm per år.

Alder-dyp forholdene i Figurene 16, 17 og 18 viser variasjon i sedimentasjonsratene gjennom tid. Figur 19 viser perioder med høyere eller lavere sedimentasjonsrater enn den tidligere beregnede lineære sedimentasjonsraten av Bucher (2020). Størst differanse fra de to sedimentasjonsratene kan en se ved Framfjorden (Figur 19). Det ble beregnet en ny lineær sedimentasjonsrate for Framfjorden, da en i denne oppgaven går vekk fra tolkningen om en utglidning som forstyrret sedimentene mellom 2,7 cm til 6,7 cm kjernedyp. Beregningen er gjort i samsvar med metoden Bucher brukte, og det er brukt tolkningen om hvor skredtoppen i Framfjorden er, ved 31,7 cm kjernedyp (Bucher 2020). Men ved å se på de gjennomsnittlige sedimentasjonsratene for den detaljerte dateringen, vist i tabellen til venstre i Figur 19, så er ikke sedimentasjonsratene så ulike. I Framfjord beregnet Bucher (2020) en sedimentasjonsrate på 0,15 cm/år, mens i den detaljerte dateringen har en sedimentasjonsrate på 0,17 cm/år. Årsaken til forskjellen kan være at Bucher (2020) har underestimert sedimentasjonsraten ved å tolke skredtoppen på feil sedimentdyp. Ved å bruke den estimerte sedimentasjonsraten fra den detaljerte dateringen på 0,17 cm/år, så vil skredtoppen være ved 35,53 cm kjernedyp. Ulikheten i sedimentasjonsraten kan også forklares ved at i den detaljerte dateringen av Framfjorden så ble det gjort en minimumsdatering, og dermed kan ha overestimert sedimentasjonsraten.

Tabellen til venstre i Figur 19 inneholder kun beregnet sedimentasjonsrater mellom toppene som er vist i Figur 16, 17 og 18.



| | Sedimentasjonsrater (cm/år) | | | Sedimentasjonsrater (cm/år) | | | |
|--------------|-----------------------------|------|------|-----------------------------|------|------|------|
| | GC06 | MC04 | MC05 | Bucher (2020) | GC06 | MC04 | MC05 |
| A-B | | 0,10 | | 0-1 | 0,11 | 0,14 | 0,15 |
| B-C | 0,07 | 0,26 | 0,57 | | | | |
| C-D | | 0,15 | | | | | |
| C-E | | | 0,05 | | | | |
| C-F | 0,07 | | | | | | |
| D-E | | | | | | | |
| D-F | | 0,07 | | | | | |
| E-F | | | 0,08 | | | | |
| F-G | 0,10 | | 0,10 | | | | |
| F-H | | 0,12 | | | | | |
| G-H | 0,13 | | 0,13 | | | | |
| H-I | 0,10 | 0,20 | 0,10 | | | | |
| Gjennomsnitt | 0,09 | 0,15 | 0,17 | | | | |

Figur 19. Detaljerte sedimentasjonsrater fra 1908-2020 og de lineære sedimentasjonsratene beregnet av Bucher (2020) fra 1811-2020 for de tre sedimentkjernene. Grafen viser blå linje for Arnafjordbassenget, oransje linje for Indrefjorden og grønn linje for Framfjorden, hvor de stiplede linjene er de lineære sedimentasjonsratene (Bucher 2020). To tabeller viser sedimentasjonsrater i cm/år, og det er bare beregnet sedimentasjonsrater for toppene sett i Figur 16, 17 og 18.

Figur 16, 17 og 18 viser at ikke alle sedimentkjerner inneholder korrelasjonshorisontene A, D, E og G. Horisontene D, E og G er mindre signifikante nedbørstopper som kan bli mindre synlige i sedimentene grunnet variasjoner i sedimentasjonsraten. Horisont A ligger helt på toppen av sedimentene. Av de tre kjernene er det bare Indrefjorden som har en (ink/koh)-topp som har blitt assosiert til denne første nedbørstoppen (A). Grunnen til at man ikke ser den samme økningen i alle tre kjerner kan være at de øverste centimeterne av sedimentoverflaten i kjerne GC06 Arnafjordbassenget og MC05 Framfjorden gikk tapt under selve prøvetakingen.

Dette gjelder særlig for Arnafjordbassenget der en gravitasjonsprøvetaker ble brukt som er kjent for å ta lange kjerner med varierende kvalitet av selve sedimentoverflaten. Dette er ikke tilfelle i Framfjorden der en multicorer ble brukt nettopp for å ivareta sedimentoverflaten. Her kan det være at sedimentoverflaten er blitt erodert av bunnstrøm eller mindre massebevegelse, eller at nedbørstoppen ikke har etterlatt seg signifikante spor. Erosjon ved bunnstrøm er mindre sannsynlig i og med at slik aktivitet ikke er synlig i sedimentene ved for eksempel en økt kornstørrelse. En markert massebevegelse er tvilsom i og med at den magnetiske susceptibiliteten avtar i toppen av alle tre kjerner. Ved erosjon eller massebevegelse ville det forventes et økt magnetisk signal (Da Silva et al. 2014, Larrasoña et al. 2008). Dermed øker sannsynligheten for at denne nedbørstoppen var for svak for å bli fanget opp i sedimentoverflaten av Framfjorden, og muligens Arnafjordbassenget. Alternativt kan den økende inkohærens i sedimentene fra Indrefjorden indikere en lokal tilførsel av organisk materiale som er uavhengig av nedbøren og eventuelt kan knyttes til den senere utviklingen av settefiskanlegget i området.

Ved sedimentkjernene fra Arnafjordbassenget og Indrefjorden ble toppen av skredmaterialet fra 1811 brukt som dateringshorisont, noe som ikke var tilfelle i Framfjorden. Ved Framfjorden ble nederste prøvetakingspunkt i kjernen satt til 1811, noe som kan ha gitt en feilkilde ved datering mellom 1811-1903, da 1903 var det siste punktet i nedbørsgrafen som fikk tildelt en (ink/koh)-bunn. I og med at en ikke kan se noen indikasjon for skredmateriale i det optiske bildet og røntgenbildet, er denne skredtoppen trolig lokalisert dypere ned i sedimentene og derfor ikke med i sedimentkjernen. Ved denne oppgaven fokuseres det på miljøendringer de siste 100 årene. Derfor burde ikke dette påvirke resultatene.

Bucher (2020), tolket at sedimentene mellom 2,7 cm til 6,7 cm i MC05 fra Framfjorden hadde blitt utsatt for en forstyrrelse ut ifra inkohærens/koherens konsentrasjonen. Han tolket dette som en utglidning og dermed at sedimentene hadde blitt avsatt av en hendelse over kort tid. Denne tolkningen er ikke blitt videreført i denne datering. Det er ikke sett noen tydelige indikasjoner i noen av elementene eller den magnetiske susceptibiliteten som tilsier at det har skjedd en utglidning. Derfor tolkes avsetningene i sedimentkjernen fra Framfjorden til å være avsatt i sin helhet under kontinuerlige, hemipelagiske forhold.

5.2 Elementanalyse

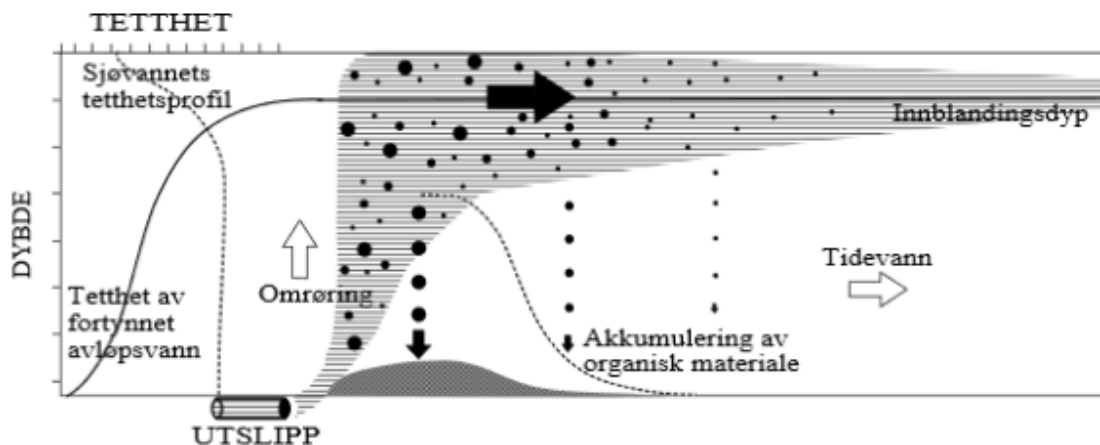
5.2.1 Organiske indikatorer

Brom (Br/Fe) er en indikator på marint organisk materiale (Ziegler et al. 2008). Brom øker mot overflaten i alle kjernene, som er også bekreftet ved korrelasjon ved dyp og brom (Tabell 4), og viser dermed til økt marin innflytelse på sedimentene i Arnafjordsystemet.

Figur 21 viser de tidligere omtalte miljøendringene markert med stolper i ulike farger som er plassert i forhold til når de respektive miljøendringene fant sted. Ved starten av gruvedriften i 1907 (rosa stolpe) viser alle kjernene en økt konsentrasjon av brom. Denne høye konsentrasjonen fortsetter å øke gjennom hele tidsforløpet til gruvedriften, og vises med kraftigere signal i Indrefjorden og Framfjorden. Årsaken kan være at gruvedriften ved Framfjorden laget et sår i berggrunnen, som førte til at mer minerogent materiale hadde mulighet til å bli transportert ut i fjordsystemet med avrenningen. Den økte mengden av minerogent materiale kan så ha tilført en økt andel minerogene næringsstoffer til fjordsystemet og dermed fremme primærproduksjonen i fjorden. Tilgjengelighet av næringsstoffer er sammen med solinnstråling en av de viktigste kildene til primærproduksjonen i akvatiske systemer (Redfield 1934). Økt primærproduksjon vil produsere økt mengde marint organisk materiale, som brom er en indikator for (Ziegler et al. 2008).

Ved 1920-tallet finnes det en markert brom-topp i Indrefjorden, som også vises i Framfjorden og i Arnafjordbassenget men da mindre kraftig. Denne toppen er tolket til å være et relikv fra brannen i 1925, der talkmøllen brant til grunn ved bredden av Framfjorden (Lee 1989). Den store brannen vil ha forårsaket at aske kom ut i fjordsystemet, og siden av å selv være organisk materiale vil denne asken kunne gi økt næring til primærproduksjonen i en kort periode. Brannen ved Framfjorden vises med et mindre kraftig signal i selve Framfjorden enn i sedimentene i Indrefjorden 3 km lengre vest. Årsaken kan være at asken ga økt næring men at det også ga økt turbiditet nærmest brannområdet. Denne turbiditeten forårsaker at primærproduksjonen får mindre solinnstråling, og den ekstra næringen som er tilført vil ikke kunne bli brukt opp i sin helhet i Framfjorden. Den ubrukte næringen vil bli transportert inn i Indrefjorden og noe ut til Arnafjordbassenget, og vil dermed gi et kraftigere signal i Indrefjorden enn i Framfjorden da det vil være mindre turbiditet her.

Den andre kraftige toppen ved 1990-tallet og nedgangen mellom 1990 til 2013 i sedimentkjerne MC04 fra Indrefjorden og i noe mindre grad i sedimentkjerne MC05 fra Framfjorden er tolket til å være forårsaket i hovedsak av oppstarten av settefiskanlegget ved Indrefjorden i 1986 (Figur 21). Settefiskanlegget tilfører konsentrert, urensert utslipp 60 meter fra land ved 30 meters vanddyb i Indrefjorden (Tveranger et al. 2007), og kjerne MC04 fra Indrefjorden er tatt ca. 300 m øst for utslippsrøret. Utslipet av det konsentrerte ferskvannet vil stige opp mot vannoverflaten (Figur 20) og bli transportert med tidevannet ut i fjordsystemet, mens store partikler vil bli avsatt i nærheten av utslippsrøret (Tveranger et al. 2007). Dette konsentrerte utslippet gir i første omgang en positiv effekt i brom ved at det ble tilført store mengder næring til primærproduksjonen, men etter en gradvis økende kapasitet sent på 1990-tallet (Tveranger et al. 2007) og dermed kontinuerlig økende utslipp vil også turbiditeten øke og dette vises ved mindre brom grunnet begrenset primærproduksjon fram til 2013 (Figur 21).

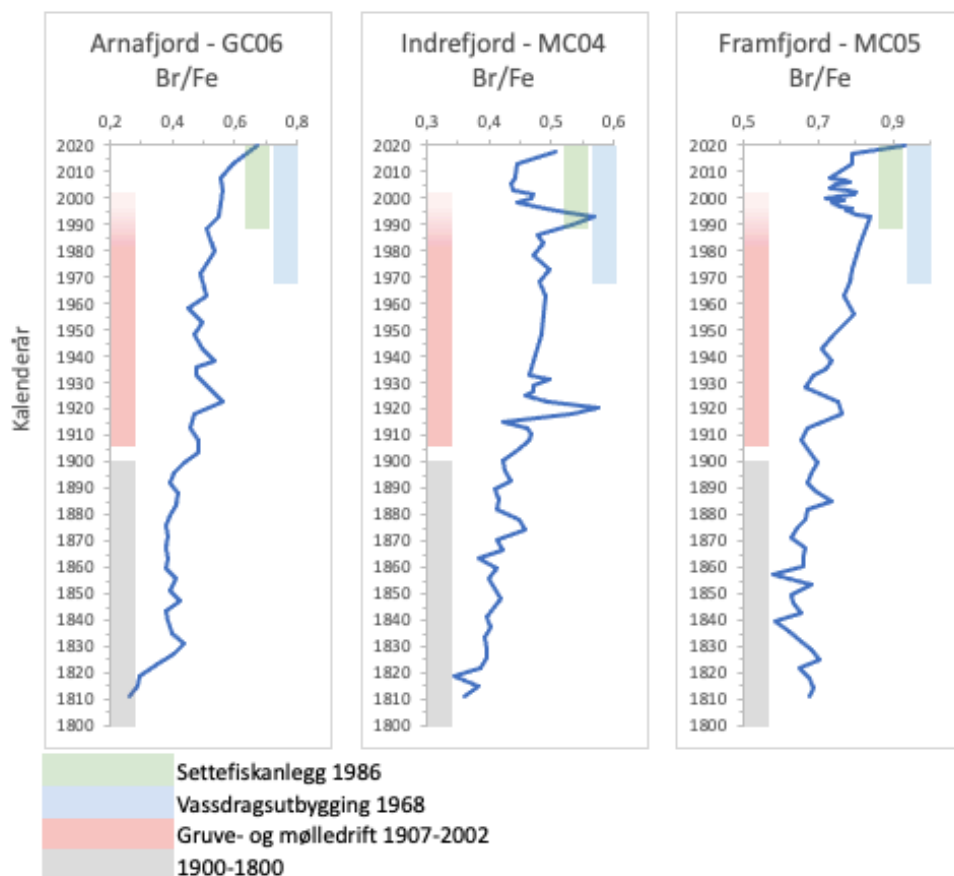


Figur 20. Skisse som viser utslipp av ferskvann i sjø. Figur hentet fra (Tveranger et al. 2007).

Årsaken til at denne markerte toppen på 1990-tallet ikke vises like markert i Framfjorden kan forklares med avstanden fra kilden og ved at sedimentkjerne MC04 (Indrefjorden) fanger opp de større partiklene fra utslippet, mens avsetningen i sedimentkjerne MC05 (Framfjorden) allerede er uttynnet som antydnet i Figur 20. De svakere signalene i Framfjorden må også sees i sammenheng med den tidsparallelle avviklingen av gruvedriften ved Framfjorden i 1984. Etter avslutningen med gruvedriften, kom det nå inn båter med talk fra Mo i Rana som skulle bli brukt i talkmøllen (Sæbø 2000, Starheim 2014). Dette kan ha forårsaket økt turbiditet spesielt i Framfjorden og Arnafjorden og dermed avtagende marin produksjon.

I 2013 gikk settefiskanlegget konkurs, og dette kan forklare økningen av marint organisk materiale (brom) rundt 2013 i Figur 21. Som følge minket det konsentrerte utslippet til Indrefjorden og dermed kunne primærproduksjonen, og som konsekvens konsentrasjonen av brom, stige tilbake til nivået før settefiskanlegget startet (Dårflot & Nævdal 2020).

En annen faktor som en er nødt til å ta i betraktning er den økte nedbøren de siste 100 årene (Figur 6). En økning som har økt den gjennomsnittlige tilførselen av ferskvann med 240 mm/år fra 1900, noe som vil forårsake mer avrenning fra land. Konsentrasjonen av brom (Figur 21) antyder at utbyggingen av vassdraget i 1968 ikke har hatt en markert effekt på det marin organiske materialet. En forklaring kan være at den økte nedbøren i kombinasjon med mindre ferskvannstilførsel på grunn av vassdragsutbyggingen utligner hverandre til en viss grad, og at en dermed får ingen tydelige signaler fra noen av hendelsene.



Figur 21. Brom (Br/Fe) for alle tre kjernene med tidsskala. Miljøendringene i studieområdet er markert med ulike farger og har sin egen legende.

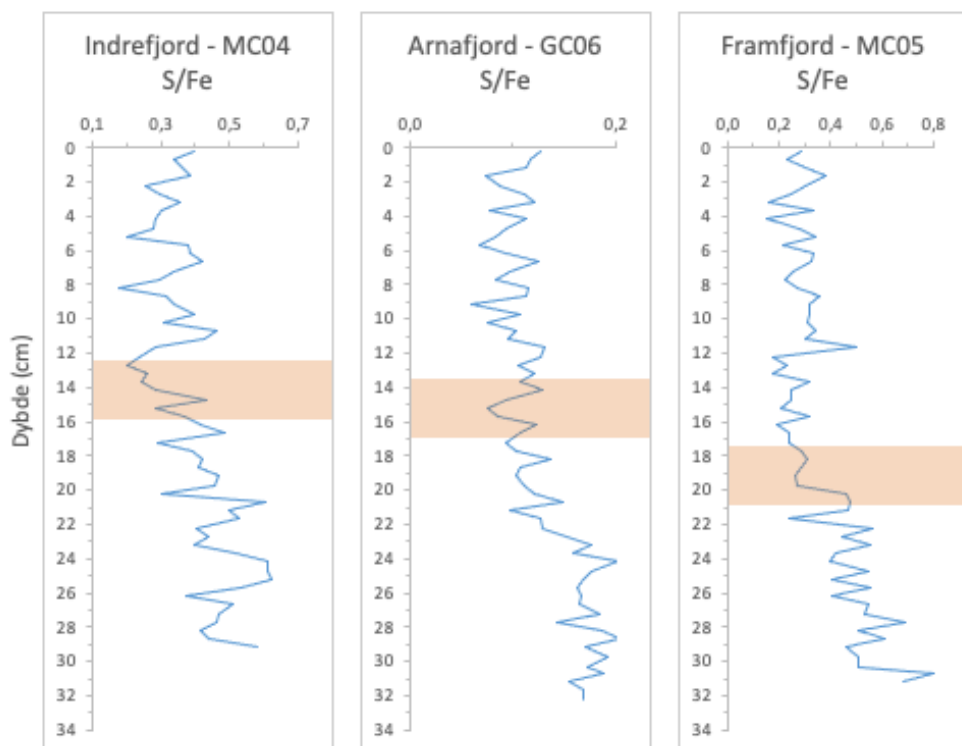
De marine (Br/Fe)-signalene bekreftes av broms korrelasjoner med **klor (Cl/Fe)** og **strontium (Sr/Fe)**, og av korrelasjoner mellom **barium** og **cerium (Ba/Ce)**. Klor (Cl/Fe), som hadde en positiv korrelasjon med brom i Indrefjorden og Arnafjordbassenget (Figur 11 og 13), akkumuleres i marine organismer ved ekstraksjon av klorid fra sjøvann (Leri et al. 2015). Den økende konsentrasjonen av klor i Indrefjorden og Arnafjordbassenget kan derfor skyldes økt marine forhold og marine organismer. På samme måte som brom og klor kan strontium (Sr/Fe) ifølge Bowen (1956) og Wallace (2019) relateres til marine forhold, som også vist i Figur 11. Alle tre fjordkjerner hadde en negativ korrelasjon mellom barium og cerium (Figur 12, 13 og 14). Økt barium fåes ved økt organisk materiale og en økende konsentrasjon av cerium indikerer oksiske forhold ved at oppløst cerium reagerer med oksygen; dette betyr at under anoksiske forhold vil det være en lavere konsentrasjon av fast cerium (Dymond et al. 1992, De Baar 1977). Barium og cerium oppfører seg motsatt av hverandre ved at økt barium ved økt marint organisk materiale fører til mindre oksygen og dermed mindre fast cerium. Den negative korrelasjonen mellom barium og cerium bekrefter dermed de marine Br-signalene som er tolket i alle tre sedimentkjerner.

Svovel (S/Fe) er en indikator for organisk materiale ved at en får økte konsentrasjoner av svovel ved økte mengder organisk materiale i sedimentet (Croudace et al. 2006). Når det kommer til korrelasjonstesten med svovel, er det bare ved Framfjorden at det er en signifikant sammenheng mellom svovel og dyp (Tabell 4). Sedimentene fra Indrefjorden har en korrelasjonskoeffisient på $r = 0,36$, som ligger under grensen på $r \geq 0,444$, foreslått for geokjemisk undersøkelse av Howarth & Sinding-Larsen (1983).

XRF-analysen vil bare registrere residualt eller fast svovel, og residualt svovel kommer hovedsakelig i form av framboidal pyritt (FeS_2), og til dels jernmonosulfid (FeS) eller organisk svovel (Jørgensen 1977). Nedbrytningen av organisk materiale krever oksygen. Etter hvert som nytt sediment blir avsatt blir det frie oksygenet brukt opp ved aerob bakteriell nedbryting av det organiske materiale, som etter hvert erstattes av økt anaerob nedbrytning gjennom først nitratreducerende og senere sulfatreducerende bakterier som først bruker oksygenet fra $(\text{NO}_3)^{2-}$ og senere fra $(\text{SO}_4)^{2-}$ i nedbrytningsprosessen av det organiske materialet (Berner 1969). Når oksygen blir brukt opp i de sulfatreducerende nedbrytningsprosessene, vil svovel settes fri og bli omdannet til hydrogensulfid (H_2S). Hydrogensulfid vil reagere med jern til mineralen svovel i form av jernmonosulfid (FeS), og

dersom mer svovel blir tilført ved bakteriell nedbrytning vil en få FeS_2 , det vil si *in situ* produsert framboidal pyritt (Berner 1969, Butler & Rickard 2000)

Ifølge Berner (1969) er sedimentær dannelse av framboidal pyritt en tidlig diagenetisk prosess som foregår fra sedimentoverflaten og nedover i sediment. Derfor tolkes også sedimentkjernene i Figur 22 fra sedimentoverflaten og nedover kjernen, det vil si i motsatt retning av den geologiske avsetningshistorien. Vær oppmerksom på at grafene i Figur 22 er vist med dybdeskala med cm som enhet. Alle tre sedimentkjerner viser en økning av residual svovel med økende dyp (Figur 22). I grafene av Figur 22 er dypet der økt produksjon av residual svovel begynner markert med oransje blokker. Omdanningsdypet er grunnest i sedimentkjernen fra Indrefjorden (rundt 14 cm sedimentdyp) og dypest i Arnafjordbassenget og Framfjorden ved henholdsvis 15,5 cm og 19,5 cm sedimentdyp. Denne fordelingen av residual svovel tillater tolkningen at sedimentene i Indrefjorden er mer utsatt for produksjon av residual svovel enn sedimentene i Framfjorden og i Arnafjordbassenget, noe som tyder på en større mengde av nedbrytbart, det vil si marint organisk materiale i Indrefjorden. Dette støtter opp under ideen at det urensede utslippsvannet fra settefiskanlegget er årsaken til økt marine primærproduksjon og tilsvarende økte bromkonsentrasjoner i Indrefjorden etter 1969 og fram til i dag. En lignende diagenetisk dannelse av residual uorganisk svovel er observert av Jørgensen (1977) i sedimentene av den delvis oksygenfattige Limfjorden i Danmark.



Figur 22. Residual svovel i de tre kjernene. Oransje blokk markerer områdene (ved omtrentlig sedimentdyb) der residual svovel begynner å øke nedover sedimentkjernene. Grafene er vist med dybdeskala i cm.

5.2.2 Minerogene indikatorer

Silisium (Si/Fe) og kalium (K/Fe) er begge elementer som indikerer minerogent materiale (Croudace et al. 2006). Silisium og kalium opptrer i silikatmineraler og er en integrert bestanddel av kvarts og særlig alkalifeltspat (ortoklas) og biotittglimmer som er de dominerende mineralene i de omgivende bergartene (Tabell 1 og 2). I korrelasjonstesten med element mot element (Tabell 5), bekreftes dette ved at det er en signifikant korrelasjon mellom silisium og kalium i alle tre kjerner.

Signalene fra silisium og kalsium er ikke like tydelig som ved brom. Gruvedriften ser ikke ut til å ha en stor innvirkning på elementfordelingen i sedimentene av Arnafjordbassenget og Indrefjorden da ingen av de to grafene i Figur 23 viser en markant forskjell fra tidsperioden før eller etter oppstart av gruvedriften. Sedimentene fra Framfjorden, det vil si i nærheten av gruvevirksomheten, viser derimot en signifikant økning av silisium og kalium etter at gruvedriften begynte i 1907.

I alle tre sedimentkjernene (Figur 23) vises en tydelig nedgang i konsentrasjonen av silisium og kalium etter vassdragsutbyggingen i 1968. Vassdragsutbyggingen førte til 75% til 80% mindre vanntilførsel i to elver, Dalselvi og Tura, som går ut i Framfjorden (Appelgren & Ledje 2016, Dårflot & Nævdal 2020). Et resultat av vassdragsutbyggingen er at fjordsystemet fikk mindre avrenning, og dermed også mindre tilførsel av minerogent materiale fra denne avrenningen. Det er tidligere vist til at økt nedbør de siste 100-årene (Figur 6) som kan ha motvirket den minkende avrenningen i en viss grad. Dette kan ha resultert i en maskering av påvirkningen fra vasskraftutbyggingen som ellers ville vært enda mer fremtredende i sedimentene fra Framfjorden, og muligens også hadde hatt en innvirkning på sedimentene fra Indrefjorden og fra Arnafjordbassenget

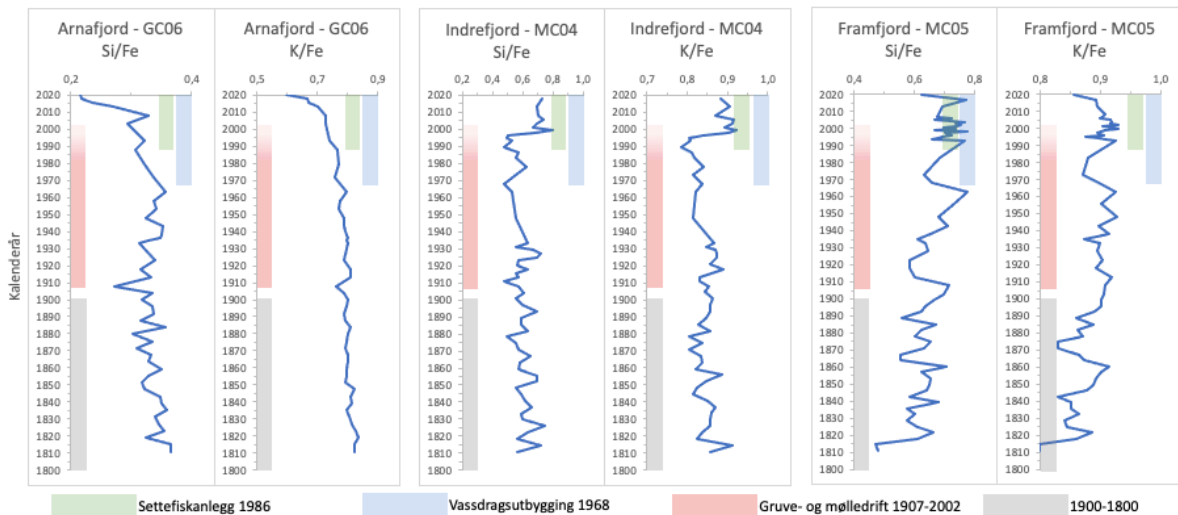
Sedimentene i Framfjorden og i Indrefjorden viser en økning av silisium og kalium ved starten av settefiskanlegget i 1984, en endring som ikke kan ses i Arnafjordbassenget. I Indrefjorden kan dette forklares med punktutslippet av det konsentrerte utslippet fra settefiskanlegget. Anlegget tar inn vann fra to elver, Breifoss og Sleipo (Tveranger et al. 2007), og etter at vannet ble brukt i anlegget slippes det urensset ut i fjorden som en konsentrert væske. Dette forklarer økningen av silisium og kalium i Indrefjorden, men ikke hvorfor en lignende økning ser ut til å forekomme på samme tid også i Framfjorden. En forklaring kan være at en del av silisium og kalium transporteres med de østgående vannstrømmene til Framfjorden for å avsettes der (Leknes 2020).

En annen forklaring kan være at økningen av silisium og kalium i Framfjorden sammenfaller med økningen av nedbør over samme tidsrom og er dermed uavhengig av økningen grunnet settefiskanlegget i Indrefjorden. På den andre siden ville det kunne forventes at en slik trend også kunne ses i Arnafjordbassenget, noe som ikke er tilfelle.

Silisium kan også være en indikator på organisk materiale da diatoméer inneholder silisium i skallet sitt i henhold til formelen $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Tesson et al. 2009). Hvis silisium var en indikator på diatoméer, ville økt silisium vært grunnet økt primærproduksjon, som igjen ville gitt utslag ved økt brom. Siden silisium og brom ikke viste å ha en korrelasjon med hverandre (Tabell 5), er silisium en indikator for minerogent materiale i dette tilfellet.

Kalium kan også gi unøyaktige målinger ved ITRAX XRF-analyse da Cl-atomer i sjøvann vil absorbere kaliumrøntgenstråler. Høy konsentrasjon av kalium kan derfor også indikere økt

porøsitet (Croudace et al. 2006). I dette tilfellet hvor silisium og kalsium viser signifikant korrelasjon, er kaliumverdiene tolket til å være forårsaket av minerogent materiale slik som silisium.



Figur 23. Grafer av silisium og kalsium for alle tre sedimentkjerner med kalenderår som enhet. Miljøendringene i studieområdet er markert i ulike farger og beskrevet med egen legende.

En svakhet ved elementanalysene er at det mangler absolutte verdier for elementkonsentrasjonene. Uten kvantifisering er det vanskelig å si hvor signifikante endringene er i sin helhet i fjordsystemet. Det at en har overlappende miljøendringer i perioder gjør det også problematisk, det kan være utfordrende å fastslå om en endring er en effekt av en bestemt miljøendring eller av to miljøendringer i kombinasjon med hverandre.

5.3 Sirkulasjons- og spredningsmønsteret

Ved alle elementene vises det svakere signaler på endringene i sedimentene fra Arnafjordbassenget sammenlignet med de sedimentære endringene i Indrefjorden og Framfjorden. Dette er tolket til å være forårsaket av hvordan vannet sirkulerer i fjordsystemet ifølge Leknes (2020), samt å være lokalisert lengre unna kildene til endring. Vannet kommer inn og ut av fjordsystemet med tidevannet, og dette vannet går først ut til Indrefjorden. Fra Indrefjorden går noe av vannet videre inn i Framfjorden, og noe av vannet går forbi Arnafjordbassenget og ut av fjordsystemet. Vannet som ankommer Framfjorden vil herfra bevege seg delvis tilbake til Indrefjorden, mens noe vil forsvinne ut i Arnafjorden. Dette sirkulasjonsmønsteret er vist i Figur 24, 25, 26 og 27 med grå piler.

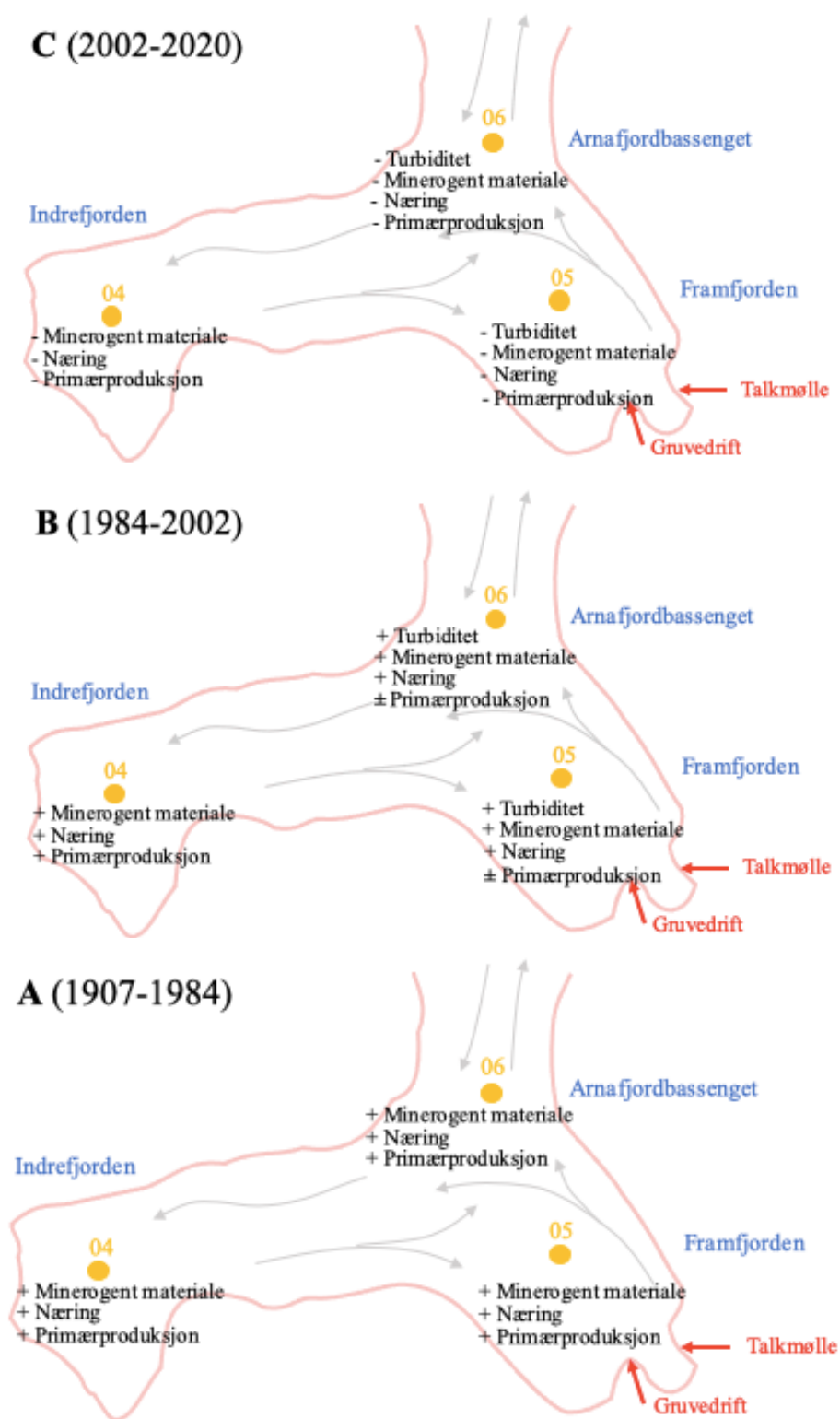
Vannet sirkulerer fram og tilbake mellom Indrefjorden og Framfjorden, så endringer i en av fjordene vil normalt vises med en endring i den andre. I Arnafjordbassenget så blir det et mer sammensatt bilde av endringene ved at en får raskere utveksling av vannet med tidevannet, og eventuelle påvirkninger utenfor Arnafjordsystemet kan påvirke Arnafjordbassenget.

Figur 24, 25, 26 og 27 viser den oppsummerte effekten de ulike miljøendringene hadde på Arnafjordsystemet.

Gruve og talkmølle (Figur 24):

- A. 1907-1984: Økt tilførsel av næring i form av oppløst minerogent materiale, fører til økt primærproduksjon i hele fjordsystemet.
- B. 1984-2002: Økt turbiditet spesielt i Framfjorden og Arnafjordbassenget på grunn av båttrafikk, som ikke påvirket Indrefjorden like kraftig. Fortsatt tilførsel av minerogene næringsstoffer.
- C. 2002-2020: Mindre turbiditet og mindre tilførsel av minerogene næringsstoffer fra gruve eller mølledrift resulterer i mindre primærproduksjon.

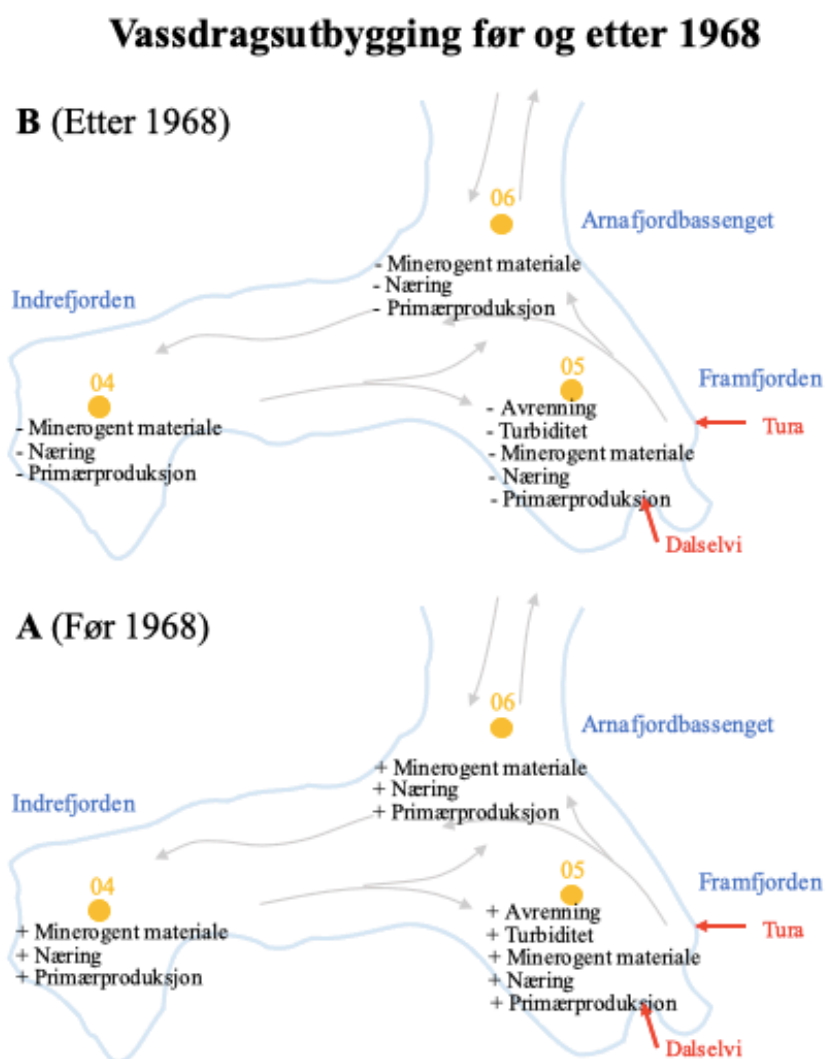
Gruve og talkmølle 1907-1984 (2002)



Figur 24. Gruve og talkmøllens sin påvirkning i Arnafjordsystemet. Viser 3 forskjellige perioder av gruve og talkmølle-driften; (A) 1907-1984 aktiv gruve-drift og mølle-drift, (B) 1984-2002 gruve-drift over og bare drift i talkmøllen, og (C) 2002-2020 hvor talkmøllen gikk ut av drift. Lokaliteten for de tre sedimentkjernene er markert med oransje prikker. Grå piler viser tolkningen for sirkulasjonsmønsteret i Arnafjordsystemet. Røde piler viser kildene, her gruve-drift og talkmøllen i tettstedet Framfjord.

Vassdragsutbygging oppsummert (Figur 25):

- A. Før 1968: Naturlig avrenning tilførte minerogene næringsstoffer til Framfjorden og opprettholdt en stabil primærproduksjon i fjordsystemet. Avrenningen førte også til naturlig stabilt turbiditetsnivå i Framfjorden.
- B. Etter 1968: Omtrent 75% til 80% mindre avrenning som tilførte mindre mengder minerogene næringsstoffer til fjordsystemet, noe som resulterte i mindre primærproduksjon i fjordsystemet. Mindre avrenning fra de to elvene førte også til mindre turbiditet i Framfjorden.

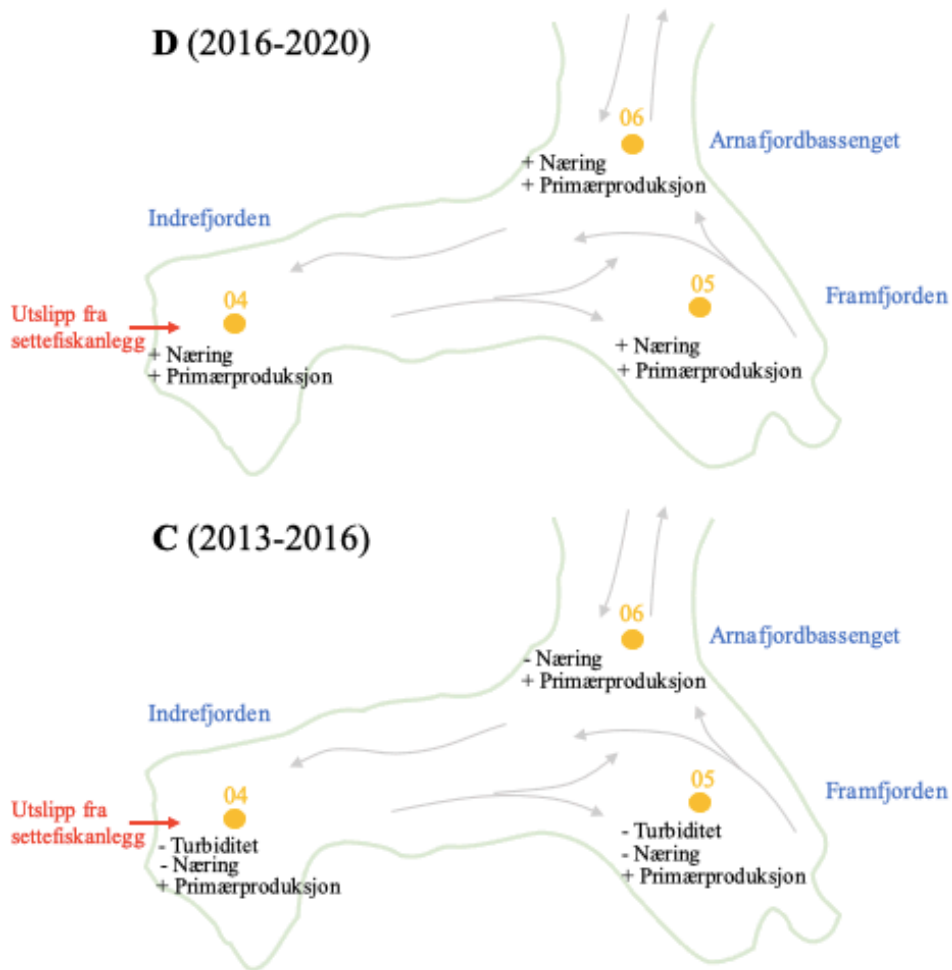


Figur 25. Vassdragsutbyggingens sin påvirkning i Arnafjordsystemet, vist i tidshorisonter fra (A) før og (B) etter vassdragsutbyggingen. Lokaliteten for de tre sedimentkjernene er markert med oransje prikker. Grå piler viser tolkningen for sirkulasjonsmønsteret i Arnafjordsystemet. Røde piler markerer kilden, her to elver (Dalselvi og Tura) som fikk redusert vanntilførsel.

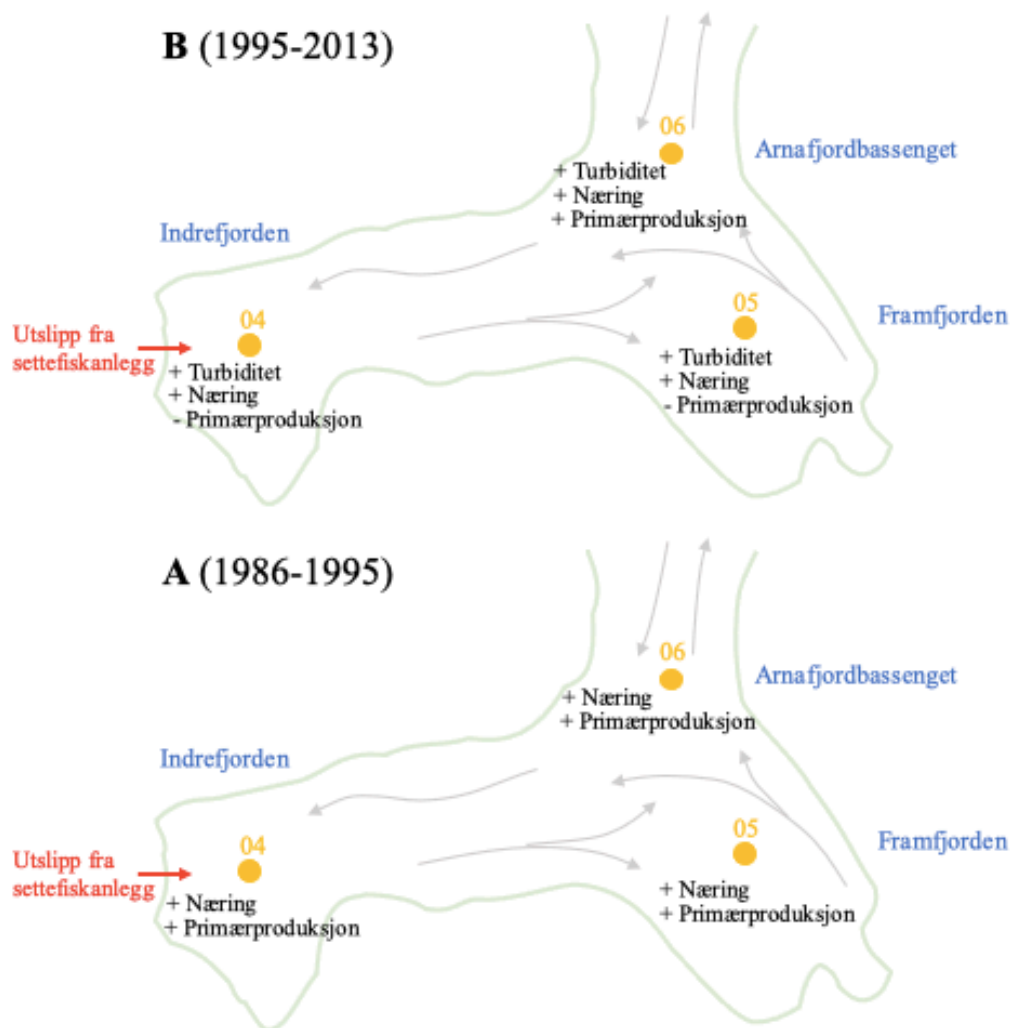
Settefiskanlegget oppsummert (Figur 26 og 27):

- A. 1986-1995: Økt næringstilførsel på grunn av utslipp fra settefiskanlegget, fører til økt primærproduksjon i hele fjordsystemet.
- B. 1995-2013: Økt turbiditet i Indrefjorden og Framfjorden ved kontinuerlig økende utslipp fra settefiskanlegget minker primærproduksjonen. Arnafjordbassenget får mer næring som ikke Indrefjorden og Framfjorden kan ta nytte av som gir økt primærproduksjon. Arnafjordbassenget viser ingen tydelige tegn på påvirkningen av den økte turbiditeten.
- C. 2013-2016: Mindre turbiditet i Indrefjorden og Framfjorden da settefiskanlegget gikk konkurs. Dermed øker primærproduksjonen igjen til et naturlig nivå. Arnafjordbassenget viser en økning i primærproduksjonen, som antyder at selv om en ikke hadde en minking i primærproduksjonen i perioden med økt turbiditet slik som Indrefjorden og Framfjorden, så var ikke produksjonen like høy som den kunne ha vært.
- D. 2016-2020: Ny oppstart av settefiskanlegget i 2016 gjenskaper de samme betingelsene og gir samme utslag i sedimentene som ved oppstart av settefiskanlegget i 1986.

Settefiskanlegg 1986



Figur 26. Settefiskanlegget sin påvirkning i Arnafjordsystemet fra 2013 til 2020, se Figur 27 for 1986 til 2013. Viser 2 ulike perioder med settefiskanlegget; (C) 2013-2016 viser opphold av settefiskanlegget grunnet konkurs og (D) 2016-2020 som viser gjenopptatt drift med redusert mengde settefisk etter 2016. Lokaliteten for de tre sedimentkjernene er markert med oransje prikker. Grå piler viser tolkningen for sirkulasjonsmønsteret i Arnafjordsystemet. Rød pil markerer kilden, her settefiskanlegget på land i tettstedet Indrefjord.



Figur 27. Settefiskanlegget sin påvirkning i Arnafjordsystemet fra 1986 til 2013, se Figur 26 for 2013 til 2020. Viser 2 ulike perioder med settefiskanlegget; (A) 1986-1995 oppstart av anlegget og effekt første 4 årene og (B) 1995-2013 viser effekten av settefiskanlegget i full drift. Lokaliteten for de tre sedimentkjernene er markert med oransje prikker. Grå piler viser tolkningen for sirkulasjonsmønsteret i Arnafjordsystemet. Rød pil markerer kilden, her settefiskanlegget på land i tettstedet Indrefjord.

Dette verifiserer resultatene av Bucher (2020). Til tross for at dateringen av Bucher (2020) viser færre detaljer er de relative endringene i forhold til hverandre like med dateringen i denne oppgaven. Den uavhengige geokjemiske elementanalysen viser til samme resultater ved miljøendringene de siste 100 årene hvor kun mindre detaljer er ulike, som Bucher (2020) fant ved å se på diatoméer og partikulært materiale på smørepreparat. Unntak er tolkningen av (Br/Fe)-signalene i henhold til innflytelsen som vassdragsutbyggingen har hatt på konsentrasjonen av de marine organiske materialet. Bucher (2020) tolket her at vassdragsutbyggingen resulterte i mindre organisk materiale, noe som ikke kan bekreftes ut ifra tolkningen i denne oppgaven. Forskjellen begrunner seg i at Bucher (2020) tolket flere

centimeter i sedimentkjernen fra Framfjorden som ras, noe som ble avkreftet av den geologiske tolkningen. Totalt sett gir begge oppgavene til sammen et detaljert grunnlag for utviklingen av den videre forvaltningen av Arnafjordsystemet.

6 Konklusjon

Sedimentene i kjerne GC06, MC04 og MC05 har fått en detaljert datering og fullstendig tidsakse.

De geokjemiske XRF elementprofilene viser til endringer over tid og kan relateres til de historiske miljøendringene og dermed deres respektive kilder.

Det ble laget en modell som viser til hvordan de historiske miljøendringene har påvirket Arnafjordbassenget, Indrefjorden og Framfjorden, samt hvordan påvirkningene har spredd seg i Arnafjordsystemet, som verifiserer resultatene av Bucher (2020).

7 Referanser

7.1 Litteratur

- Appelgren, L. & Ledje, U. P. (2016). *Overføring av Langvatnet, Vik kommune - virkninger for miljø og naturressurser*. Ecofact rapport 504.
- Berner, E. K. & Berner, R. A. (1987). *The Global Water Cycle: Geochemistry and Environment*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall: Pearson College Div; 1st edition.
- Berner, R. A. (1969). The synthesis of framboidal pyrite. *Economic Geology*, 64(4), s. 383-384.
- Bowen, H. (1956). Strontium and barium in sea water and marine organisms. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 35(3), s. 451-460.
- Bucher, A. (2020). *Recent environmental change as recorded in sediments from the Arna fjord system, Western Norway*. Western Norway University of Applied Sciences, bacheloroppgave.
- Butler, I. B. & Rickard, D. (2000). Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulphide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(15), s. 2665-2672.
- Croudace, I. W., Rindby, A. & Rothwell, R. G. (2006). ITRAX: Description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner. In: RG Rothwell, (ed.): *New techniques in sediment core analysis*. Geological Society, London, Special Publication 267, s. 51-63, 266pp.
- Da Silva, A., Whalen, M., Hladil, J., Chadimova, L., Chen, D., Spassov, S., Deyleeschouwer, X. (2014). *Magnetic Susceptibility Application: A Window onto Ancient Environments and Climatic Variations*. Geological Society, London, Special Publications 414, s. 275.
- Dårflot, I. & Nævdal, T. B. (2020). *Vilkårsrevisjon Arna fjord Vikvassdraga, Revisjonsdokument*.
- De Baar, H. J. (1977). *The Marine Geochemistry of the Rare Earth Elements (Ph.D.)*. Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Earth, Atmospheric, and Planetary.
- De Korte, L. (2021). *Defining current ecological status and in situ reference conditions using benthic foraminifera - A study from Arna fjord and Indrefjord, Western Norway*. Western Norway University of Environmental Sciences: MSc Thesis, Department of Environmental Sciences.
- Dymond, J., Suess, E., & Lyle, M. (1992). Barium in deep sea sediments: A geo-chemical proxy for paleoproductivity. *Paleoceanography* 7(2), s. 163-181.
- Furuset, A. (2006). *Skredulykker i Norge*. Tun Forlag, s. 207.

- Geotek (2016, 01.11). *Multi-Sensor Core Logger* (Manual). UK, Northamptonshire, s.232.
- Grimelid, F. (2016, 29.06). Har unngått krav om reinseanlegg sidan 1986. *Firda*.
- Høst, J. (2006). *Store fjellskred i Norge. Landbruks- og matdepartementet*.
- Howarth, R. J. & Sinding-Larsen, R. (1983). Multivariate analysis. In: R. J. Howarth (ed.): *Statistics and data analysis in geochemical prospecting*. Elsevier Science, Amsterdam, s. 207-289.
- Jørgensen, B. B. (1977). *The sulfur cycle of coastal marine sediment (Limfjorden, Danmark)*. Ny Munkegade, DK-8000 Aarhus C, Denmark: Institute of Ecology and Genetics, University of Aarhus.
- Jenkins, R. (1999). X-Ray Fluorescence Spectrometry. In: JD Winefordner (ed.): *A series of monographs on analytical chemistry and its applications*. John Wiley & Sons Inc. 2nd Edition 152, s. 232.
- Larrasoana, J., Roberts, A. & Rohling, E. (2008). Magnetic susceptibility of eastern Mediterranean marine sediments as a proxy for Saharan dust supply? *Marine Geology* 254(3-4), s. 224-229.
- Lee, G. (1989). Gruve og mølledrift i Framfjorden fra 1908. *Pridlao* 6(1), s. 55-56.
- Leknes, E. (2020). Subaquatech: *Straummåling ved Arna fjord april-juni 2020*. s. 22
- Leri, A., Northrup, P., Thornton, K. & Dunigan, M. (2015). A marine sink for chlorine in natural organic matter. *Nature Geoscience* 8, s. 620-624.
- Liugman, A. & Slettebø, D. (2020). Åkerblå: *Punktutslippsundersøkelse (NS-EN ISO 16665:2014) for Arna fjord*. Sistranda, s. 44.
- Nesse, W. (2012). *Introduction to mineralogy 2nd edition*. New York, Oxford University Press, s.496.
- Paetzel, M. & Dale, T. (2010). Climate proxies for recent fjord sediments in the inner Sognefjord region, western Norway. *Geological Society, London*, s. 271-288.
- Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London* 58, s. 240-242.
- Ramberg, I. B., Bryhni, I., Nøttvedt, A. & Rangnes, K. (2013). *Landet blir til - Norges geologi 2.utg*. Trondheim, Norsk Geologisk Forening (NGF).
- Ratner, B. (2009). The correlation coefficient: Its values range between +1/-1, or do they? *Journal of Targeting, Measurements and Analysis for Marketing* 17, s. 139-142.
- Redfield, A. C. (1934). On the proportions of organic derivatives in sea water and their relations to the composition of plankton. In: *James Johnstone Memorial Volum* 7(10), University Press of Liverpool, s. 176-192.

- Rothwell, R. G. (1989). *Minerals and Mineraloids in Marine sediments - An optical identification guide*. London, Elsevier Applied Science, s. 279.
- Rothwell, R. G. & Rack, F. R. (2006). New techniques in sediment core analysis: an introduction. In: *New techniques in sediment core analysis*, Geological Society of London, Special Publication 267, s. 1-29.
- Schober, P., Boer, C. & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia* 126(5), s. 11763-1768.
- Sæbø, A. I. (2000). Skreder i Vik. *Pridlao* 17(2), s. 56.
- Starheim, O. (2011, 08.06). NRK Sogn og Fjordane: *Talkgruvene i Framfjorden*. Allkunne – levande leksikon.
- Tesson, B., Genet, M., Fernandez, V., Rouxhet, P. G. & Martin-Jézéquel, V. (2009). Surface Chemical Composition of Diatoms. *ChemBioChem* 10(12), s. 2011-2024.
- Tveranger, B., Johnsen, G. B. & Hellen, B. A. (2007). Rådgivende Biologer AS: *Dokumentasjonsvedlegg til søknad om utvidelse ved Marine Harvest Norway AS avd. Vik*. Rapport 909, s. 27.
- Wallace, A. F. (2019). Organic interfaces enhance strontium content of marine barite. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(27), s. 13161-13162.
- Ziegler, M., Jilbert, T., de Lange, G. J., Lourens, L. J. & Reichert, G. J. (2008). Bromine counts from XRF scanning as an estimate of the marine organic carbon content of sediment cores. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 9(5), Q05009,

7.2 Nettsider

- Http 1: Kartverket. (u.d.). *Norgeskart*. Hentet fra <https://norgeskart.no/geoportal/#!?project=geonorge&layers=1002&zoom=2&lat=7197864.00&lon=306722.00>
- Http 2: Mareano. (u.d.). Hentet fra http://mareano.no/kart/mareano_en.html?language=en&selectedLayers=432,202,354#maps/5862
- Http 3: NGU. (u.d.). *Berggrunnskart*, regional hovedbergart, (1:250 000). Hentet fra <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/>
- Http 4: Meteorologisk institutt. (u.d.). *eKlima*. Hentet fra: http://sharki.oslo.dnmi.no/portal/page?_pageid=73,39035,73_39049&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Http 5: Monsen, S. (2017, 02.11). *Gravity corer*. Institutt for geovitenskap, Universitet i Bergen: <https://www.uib.no/geo/111790/gravity-corer>

Http 6: Monsen, S. (2017, 13.11). *Multi corer*. Institutt for geovitenskap, Universitet i Bergen:
<https://www.uib.no/geo/111815/multi-corer>

Http 7: Frøslie, K. F. (2020, 09.11). *Korrelasjon*. Store norske leksikon.
<https://snl.no/korrelasjon>

Http 8: Statens kartverk. (u.d.). *Norge i bilder*. Hentet fra
<https://www.norgebilder.no/>

Appendiks

Appendiks A: Rådata fra XRF-elementanalysen og magnetiske susceptibilitet, med tilhørende grafer finnes i vedlagt Excel fil: «Anna Grønlund 04.06.2020 Appendiks A»

Appendiks B: Den fullstendige dateringen med tilhørende grafer, nedbørsdata og beregnede sedimentasjonsrater finnes i vedlagt Excel fil: «Anna Grønlund 04.06.2020 Appendiks B»

Appendiks C: Fullstendig korrelasjonstest for alle tre kjerner finnes i vedlagt Excel fil: «Anna Grønlund 04.06.2020 Appendiks C».