Ottar

Metanlekkasjer i Arktis – hvordan påvirker de klima og miljø?

4 · 2022 · Nr. 342 · Årgang 68 · kr 65,–

UiT Norges arktiske universitetsmuseum

Ansvarlig redaktør:
Lena Aarekol

Fagredaktør:
Inger Storli

Manuskript og tips om tema,
adresseendring m.m. bes sendt til:
Ottar, Norges arktiske universitetsmuseum
Postboks 6050, Langnes, 9037 Tromsø
Tlf. 77 64 40 00
E-post: ottar@uit.no
Internett: http://uit.no/ottar

Disse tekstilbitene, som sannsynligvis har tilhørt ulike klesplagg, stammer fra ei kvinnegrav som ble undersøkt på Hillesøy utenfor Tromsø i 2018. Kvinna ble gravlagt i en ca. 8 meter lang båt omkring år 800.
Grava inneholdt også flere smykker og ulike redskapstyper.
Funnet er nærmere omtalt av Anja Roth Niemi i artikkelen «Båtgravene fra Hillesøy» i Ottar nr. 1, 2021.

Tekst: Inger Storli

Foto: Mari Karlstad, Norges arktiske universitetsmuseum, mai 2022. (TS15802.2)

Ottar utgis av Norges arktiske universitetsmuseum og akademi for kunstfag
UiT Norges arktiske universitet
Utkommer med 5 hefter i året. Årgang 68. Opplag: 2 300.
Porto pr. sendte enkelthefte: 35,- kr.
Abonnementspris kr 270,– . Pris pr. hefte kr 65,– .
Abonnementet gjelder til det blir sagt opp skriftlig.
Ettertrykk fra Ottar kun med Ottar-redaksjonens tillatelse.
Grafisk form: Peter Knudsen.
Grafisk produksjon: Grafiske tjenester ved UiT Norges arktiske universitet.
Trykk: Lundblad Media AS, Tromsø.

Redaksjonen er ikke ansvarlig for den enkelte forfatters synspunkter.

Trykksak
2041 0672

Ottar

Metanlekkasjer i Arktis – hvordan påvirker de klima og miljø?

Populærvitenskapelig tidsskrift fra Norges arktiske universitetsmuseum nr. 342 · 2022

Ottar sa til Herren sin, Alfred konge, at han budde lengst nord i landet ved Vesthavet. Han sa at landet likevel var mykje lenger mot nord, men at det er heilt ubygt. Einast på nokre få stader her og der held finnar til. Om vinteren driv dei med jakt og om sommaren med fiske ved havet.

Slik begynner fortellingen til den nordnorske høvdingen Ottar. Omkring 890 foretok han en reise til England, og ga Kong Alfred en beretning om Nord-Norge og om en ferd langs kysten til Kvitsjøen. Beretningen ble føyd inn i kong Alfreds oversettelse av Orosius' verdenshistorie. Inspirert av den gamle håløyghøvdingens nysgjerrighet og fortellerglede, har OTTAR siden 1954 trykt artikler om nordnorsk og arktisk natur, kultur og samfunnsliv.

Forside: Forskningsfartøyet Kronprins Haakon i isen.
Foto: Dimitri Kalenitchenko

Bakside: Gasshydrater som oppløses i havet.
Foto: Giuliana Panieri

Innledning
Karin Andreassen 2

Hvor kommer metanlekkasjene fra?
Stefan Bünz, Andreia Plaza-Faverola, Sunil Vadakkepuliyambatta og Malin Waage 6

Istidenes betydning
Monica Winsborrow, Karin Andreassen, Henry Patton og Pavel Serov 12

Økosystem som filter for metanlekkasjer
Arunima Sen, Vincent Carrier og Mette M. Svenning 18

Overvåking av metan i vannet
Benedicte Ferré, Knut Ola Dølven og Muhammed Fatih Sert 24

Da Barentshavet lekket som en sil
Jochen Knies, Aivo Lepland, Shyam Chand og Gudmund Løvø 30

Små, men fulle av gode historier: hva kan kalkskjellene til små havdyr fortelle oss om moderne klimaendringer og metanlekkasjer?
Naima El bani Altuna, Griselda Anglada-Ortiz, Kasia Melaniuk, Siri Ofstad, Mohamed M. Ezat og Kamila Sztybor, Christine Lockwood-Ireland og Tine L. Rasmussen 35

Formidling av forskning i CAGE
Mariana Esteves og Karin Andreassen 43

CAGE Database, fra intern ressurs til offentlig arv
Fabio Sarti og Karin Andreassen 46

Innledning

Naturlige lekkasjer til havet og atmosfæren av metangass, en drivhusgass som er mye kraftigere enn CO_2, har fått mye oppmerksomhet de siste ti-årene fordi metanmengdene i atmosfæren stiger raskt og fordi denne gassen har høyt oppvarmingspotensiale, og vil dermed kunne styre hvor raskt oppvarmingen skjer. I Arktis er store mengder metan lagret under havbunnen som gasshydrater, en islignende blanding av metan og vann. Temperaturene i Arktis stiger i dag omtrent tre ganger raskere enn globalt gjennomsnitt. Det er stor usikkerhet knyttet til hvor store disse grunne, frosne metanlagrene er, hvor utsatte de er for å tine og ytterligere forsterke den globale oppvarmingen og påvirke havmiljøet.

Dette var noe av bakgrunnen for at Norges Forskningsråd (NFR) i 2012 vedtok å støtte søknaden fra geoforskere ved Institutt for Geovitenskap (IG), Fakultet for Naturvitenskap og Teknologi (NT Fak), Universitetet i Tromsø om nasjonalt Senter for Fremragende Forskning (SFF), og dermed opprette CAGE – Senter for Arktisk Gasshydrat, Miljø og Klima (Center for Arctic Gas Hydrate, Environment and Climate) for perioden 2013–2023.

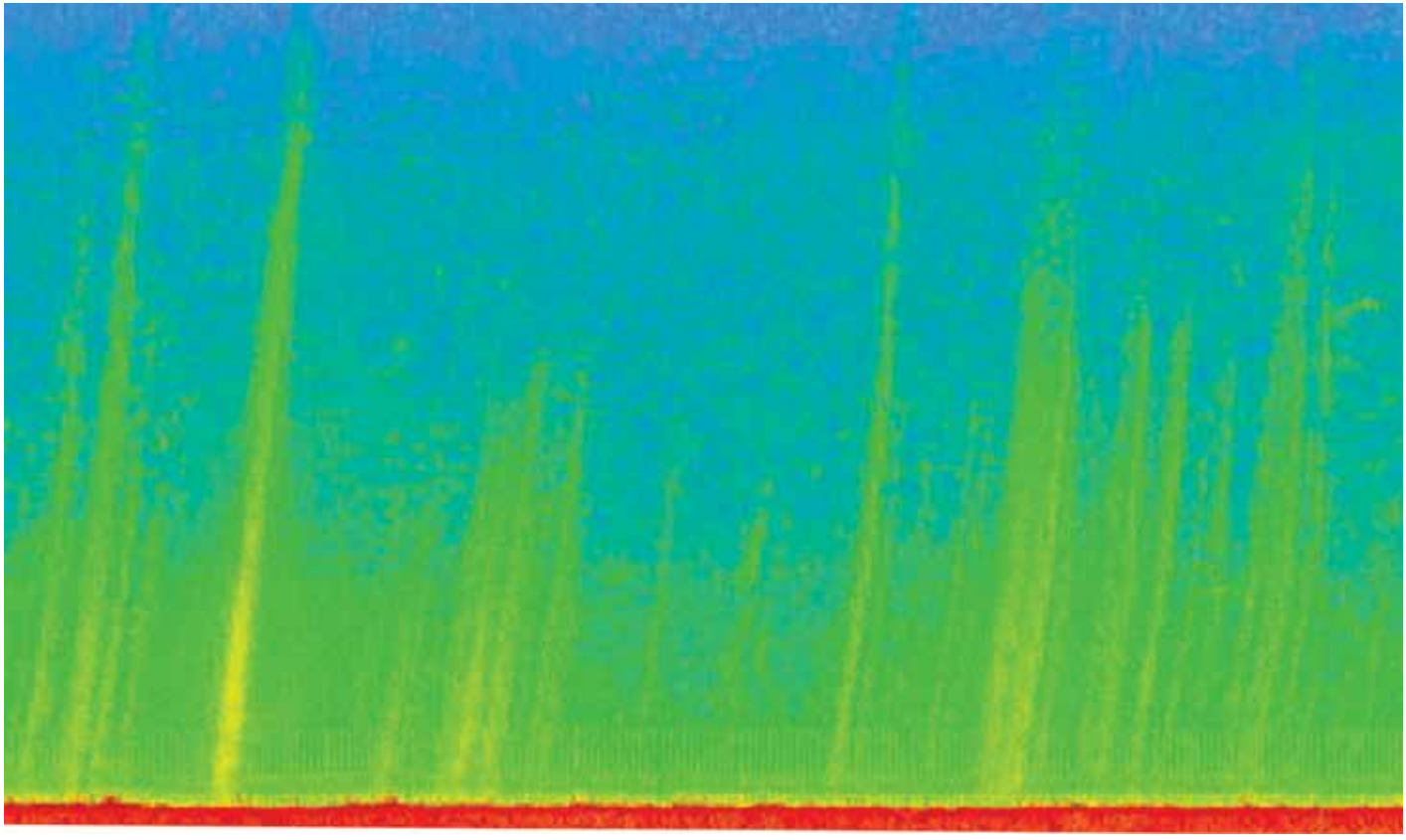
Formålet med SFF-ordningen til NFR (Sentre for fremragende forskning (forskningsradet.no)) er å gi Norges fremste vitenskapelige miljøer muligheten til å organisere seg i sentre for å nå ambisiøse vitenskapelige mål gjennom samarbeid og med langsiktig grunnfinansiering. Forskningen til sentrene skal være nyskapende og ha stort potensiale for grensesprengende resultater som flytter den internasjonale forskningsfronten.

Vi var fire professorer ved Universitetet i Tromsø som i 2013 startet CAGE, nå er over 50 forskere involvert. Forskningen ved sentret har vært kjempespennende, og har gitt mange interessante og viktige resultater. Sentrets forskere har så langt publisert over 430 vitenskapelige artikler i anerkjente internasjonale tidsskrifter, rundt 60 av disse i Nature- og Science-tidsskrift, som er kjent som de mest fremragende vitenskapelige tidsskrift. Følgende faktorer har vært viktige for vår suksess: vi adresserer viktige tema, som metan, gasshydrat, klima og miljø; vår forskning er tverrfaglig; vi benytter ny og innovativ teknologi; vår beliggenhet og infrastruktur gir naturlige fortrinn sammenlignet med andre forskningsaktører i Arktis.

Viktig tema

Metan er en viktig drivhusgass, nest viktigst etter CO_2. Sammenlignet med CO_2 er den opptil 85 ganger bedre til å absorbere varme, men den er en såkalt kortlevd klimagass med en halveringstid i atmosfæren på 10–12 år. Til sammenligning har CO_2 en halveringstid i atmosfæren på ca. 35.000 år, men CO_2 er på kort sikt mindre skadelig enn metan. I et 20-års perspektiv vil det globale oppvarmings-potensiale av 1 tonn metan i atmosfæren tilsvare oppvarmingen til 85 tonn av CO_2, mens oppvarming av 1 tonn metan i atmosfæren etter 100 år vil tilsvare ca. 28 tonn av CO_2. Metanutslipp til atmosfæren vil med andre ord ha sterkere påvirkning enn CO_2 på hvor raskt jordas oppvarming vil skje.

Konsentrasjonene av metan i atmosfæren har økt jevnt siden den industrielle epoke startet sent på 1700-tallet. Dagens metanverdier er nesten det tredobbelte av tidligere, naturlige maksimums-verdier fra de siste 800.000 år. I dag kommer omtrent 60 % av metanutslippene fra menneskeskapte kilder, som forbrenning av kull, olje, gass og biomasse, lekkasjer fra olje- og gass-installasjoner, utslipp fra drøvtyggere, rismarker og avfallsdeponier. Disse utslippene bidrar til oppvarming av jorda og havene, som igjen kan øke utslippene av metan fra naturlige kilder, inkludert gasshydrater og permafrost og dermed gi klima-endringene en selvforsterkende effekt.



Profil registret med multistråle ekkolodd, som viser gulgrønne søyler av metanbobler som strekker seg fra havbunnen (rød linje nederst) og nesten opp til havoverflata (toppen av profilet) i det nordlige Barentshavet. Fra CAGE forskningstokt nummer 4 i 2021.

Gasshydrater er is-lignende, kjemiske forbindelser der gassmolekyler er fanget i krystallstrukturen til hydrogen. Siden gasshydrater oftest inneholder over 99 % metangass, brukes begrepene metanhydrat og gasshydrat i samme betydning. Imidlertid vil gasshydrater i områder med dypere petroleums-reservoarer, som i Barentshavet og store deler av Arktis, ofte også inneholde tyngre gasser som etan, propan og butan. I motsetning til vanlig is, som smelter ved 0°C, er gasshydrater stabile ved høyere temperaturer hvis trykket er høyt nok. Det har lenge vært kjent at gasshydrater fins i naturen i polområdene, der det er kaldt, og under havbunnen på havdyp dypere enn ca. 300 m, der trykket er høyt på grunn av overliggende vann. Forskning ved CAGE har blant annet satt søkelys på at gasshydrater også vil være stabile under store isdekker på grunn av overliggende trykk fra isen.

Tverrfaglig forskning

CAGE benytter tverrfaglig forskning og metodikk til å utforske metan-reservoarer under havbunnen, forholdene på havbunnen, i vannsøylen og i atmosfæren. For å forstå

framtidig betydning av metanlekkasjer, hvordan disse vil påvirke jordas klima og havmiljø, er det en rekke spørsmål som må adresseres:

Hvor mye karbon er lagret i arktiske metanhydrater, og hvor utsatte er de for å tine i et stadig varmere Arktis?
Hvor mye av metan som lekker fra havbunnen vil nå den øvre vannsøyla og atmosfæren?
Hvilken rolle spiller økosystemet som filter for metanlekkasjer fra havbunnen?
Hvordan har utviklingen av metansystemer og lekkasjer fra disse vært gjennom tidligere tider, og hvordan kan disse dateres?
Hvilken rolle spiller isdekker for lagring av metanreservoarer under isen, og hva skjer med metanlagrene når det blir varmere og isen trekker seg tilbake?

Disse spørsmålene omfatter utviklingen av komplekse metansystem gjennom geologisk tid, og svarene krever forskning som kobler fagfeltene geologi, geofysikk, oseanografi, biogeokjemi, biologi og glasiologi. Det krever kartlegging av dagens metansystem i det marine Arktis og numeriske beregninger for framtidig utvikling. Som SFF i snart ti år har CAGE fått ressurser og mulighet til å svare på disse spørsmålene.

Beliggenhet, infrastruktur og avansert teknologi

Lokalisering av CAGE ved UiT – Norges Arktiske Universitet er perfekt for studier av utviklingen i det marine Arktis, og gir oss et såkalt komparativt fortrinn sammenlignet andre institusjoner som driver forskning i Arktis. Vi har Barentshavet og Norskehavet rett utafor døra, og det er ikke lang vei til Polhavet. UiT har generøst siden oppstart av sentret i 2013 gitt våre forskere tilgang til forskningsfartøy. CAGE har hatt ca. 50 døgn med forskningstokt hvert år. UiTs Forskningsfartøy *Helmer Hanssen* har vært benyttet regelmessig til utforskning i områder med mindre krevende isforhold eller der en ikke trenger dynamisk posisjonering. Norges nye isgående forskningsfartøy *Kronprins Haakon* (KPH) har åpnet opp nye områder i et isdekket polhav, og gjør det mulig å bruke større og mer avansert utstyr til styrt prøvetakning og visualisering av havbunnen, som undervannsfarkosten (ROV) ÆGIR 6000.

Utforskning av havområdene i Arktis er utfordrende og ressurskrevende. Vi integrerer avansert teknologi for innsamling av empiriske data med ny metodikk for numeriske modelleringer. Vi har satt sammen skreddersydde utstyrspakker som er utviklet for å påvise reservoarer av gasshydrater under havbunnen i Arktis, for å utforske hva som kontrollerer oppbygning av disse og lekkasjer fra dem, og hva som skjer videre på havbunnen, gjennom vannsøyla, opp til havoverflaten og eventuelt atmosfæren.

Innhold i dette nummeret av Ottar

Etter som vårt SFF-senter CAGE nærmer seg slutten, ønsker vi her å samle noen av våre resultater i et felles populærvitenskapelig tidsskrift og informere om hvor en kan få tilgang til data, resultater og rapporter fra vår forskning. Nå i høst 2022 er det ti år siden Norges Forskningsråd vedtok å støtte SFF- søknaden fra geoforskere ved UiT og opprette «CAGE – Senter for Arktisk Gasshydrat, Miljø og Klima» for perioden 2013–2023. Dette nummeret av Ottar er en måte å markere dette jubileet på, å samle informasjon og resultater fra CAGE før sentret avsluttes 28 januar 2023. De utvalgte bidragene gir smakebiter av vår forskning.

Stefan Buenz og medforfattere forklarer hvor metanlekkasjer kommer fra, hvordan vi kan kartlegge reservoarer av metan under havbunnen, hvordan vi kan påvise tilstrømming av metan fra dypere kilder og lekkasjer til havbunnen. De omtaler også hvordan utvikling av ny teknologi for tre-dimensjonal kartlegging og visualisering av undergrunnen har gitt oss mulighet til å samle inn data få andre akademiske institusjoner har muligheter til.

Benedicte Ferré og medforfattere beskriver hvordan metan som lekker fra havbunnen transporteres oppover i vannkolonna, hvordan vi tar vannprøver og måler metanmengder i vannet, hvordan vi bruker

multistråle-ekkolodd til kartlegging og kvantifisering av gasstransport i vannsøyla, og undervannsroboter til visuelle observasjoner og målrettet prøvetaking.

Arunima Sen og medforfattere forteller om økosystemet som livnærer seg på metan som strømmer ut fra havbunnen. De viser eksempler på hvordan metangassen gir liv til bakterier og dyr som lever sammen i biologiske oaser på havbunnen, og hvordan disse samtidig utgjør et biologisk filter som reduserer metantransport videre oppover i vannet.

Monica Winsborrow og medforfattere skriver om hvordan store ismasser i løpet av tidligere istider har skapt perfekte forhold for lagring av metanhydrat under isen, noe som har ført til områder med storskala lekkasje av metan og olje etter at isen trakk seg tilbake. De diskuterer også hvilken betydning metanutslipp fra dagens iskapper i Antarktis og på Grønland kan ha for klimaet på en stadig varmere jord.

Jochen Knies og medforfattere forklarer hvordan vi kan rekonstruere mengde, tidspunkt og kontroll på fortidens metanutslipp ved å studere karbonatbergarter som er dannet av tidligere metanlekkasjer, mikrofossiler i sedimentkjerner og geologiske arkiver.

Naima El bani Altuna og medforfattere forteller hvordan vi kan studere kalkskjellene til små havdyr for å finne sammenheng mellom metanlekkasje, klima, karbondioksyd, havtemperaturer og havforsuring.

Mariana Esteves og **Karin Andreassen** beskriver hvordan CAGE aktivt har benyttet forskningsformidling til å opparbeide en egen identitet og omdømme.

Fabio Sarti og **Karin Andreassen** gir en samlet oversikt over resultater fra CAGE, hvor en kan finne publikasjoner, rapporter, medieoppslag og blogger. De gir også oversikt over hvilke data som er samlet inn, hvor de er samlet inn, hvor de er lagret og hvor en kan få tilgang til dem.
En stor takk til alle som har jobbet i CAGE, til Norges Forskningsråd for generøs finansiering og til IG, NT Fak og UiT for uvurderlig støtte, både praktisk og økonomisk.

God lesing!

Karin Andreassen
hefteredaktør

Karin Andreassen er professor i marin geologi og geofysikk ved UiT – Norges Arktiske Universitet. Hun har vært direktør for CAGE siden 2017, og var i perioden 2013–2017 assisterende direktør i sentret.
E-post: karin.andreassen@uit.no.

Hvor kommer metanlekkasjene fra?

Stefan Bünz, Andreia Plaza-Faverola, Sunil Vadakkepuliyambatta og Malin Waage

Metan er ujevnt fordelt langs kantene av Polhavet og utgjør en betydelig karbonkilde. Mengden av metan under havbunnen er kontrollert av hvor raskt metan dannes dypere i undergrunnen, hvor raskt den migrerer oppover i lagrekken og om den når sonen med rett temperatur og trykk for at den kan lagres som gasshydrat. Gassen migrerer oppover langs forkastninger, brudd og skråstilte lagflater. Heving eller senkning av jordskorpa, for eksempel knyttet til istider, kan reaktivere gamle brudd under havbunnen og føre til variasjoner i metanstrømmen.

Et hydrokarbon er en organisk kjemisk forbindelse som utelukkende består av hydrogen og karbonatomer. Den enkleste form for hydrokarbon er metan som består av et karbonatom og fire hydrogenatomer. Hydrokarboner er naturlige forbindelser og danner grunnlaget for råolje, naturgass, kull og andre viktige energikilder. Hydrokarboner er svært brennbare og produserer karbondioksid, vann og varme når de brennes. Derfor er hydrokarboner svært effektive som drivstoffkilde.

Hydrokarboner forekommer naturlig over hele verden, og stammer fra plante- og dyrefossiler som har blitt omdannet under høy temperatur og trykk i undergrunnen gjennom millioner av år. De finnes for det meste dypt under jordoverflaten eller havbunnen, i porøse fjellformasjoner, som sandstein, kalkstein og skifer. Porøse fjellformasjoner finnes ofte under store vannmasser, og derfor vil store mengder hydrokarboner ofte være fanget dypt under havet. Det første stadiet av hydrokarbondannelse er dominert av biologisk aktivitet og kjemisk omorganisering. Disse prosessene fører til produksjonen av biogen metangass, og er en del av prosessen med nedbrytning av organisk materiale utført av anaerobe mikroorganismer, som lever og vokser uten oksygen i den grunne undergrunnen, ca. 500–700 m under havbunnen. Dypere i undergrunnen produseres metan ved nedbryting av organisk materiale under høye temperaturer, og omtales som termogen metan.

Gasshydrat som hydrokarbonfelle

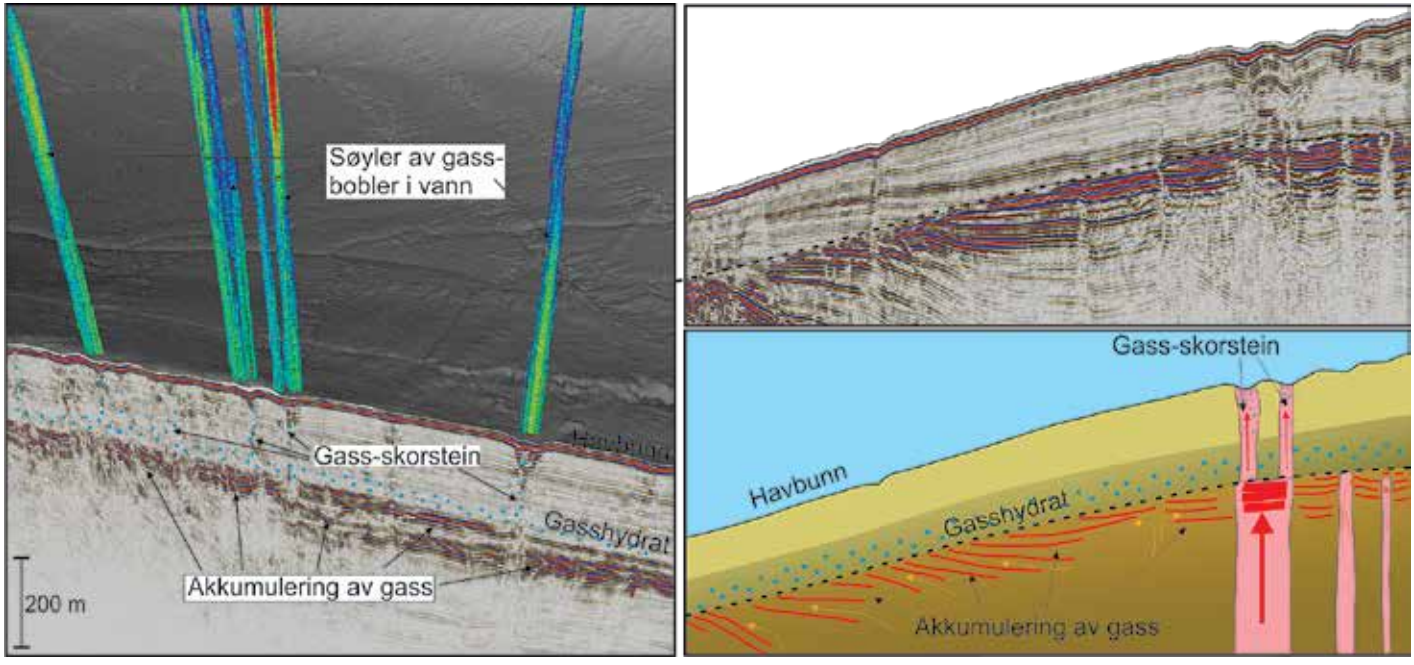
En spesiell felletype for hydrokarboner er gasshydrat, som dannes av porevann og gass som strømmer oppover i lagrekken. Gasshydrater er en fast forbindelse som likner is, men den inneholder store mengder hydrokarbon (99 % metan) som er fanget i iskrystallene. Gasshydrater forekommer i marine sedimenter innenfor gasshydratstabilitetssonen som strekker seg noen få hundre meter under havbunnen på kontinentalmarginer, men nøyaktig hvordan gasshydrat fordeler seg i hydratsystemer og på tvers av bassenger og marginer er stort sett ukjent. På tropiske og tempererte marginer blir hydrater stabile i grunne sedimenter når vanndypet er større enn ca. 500 m. Men i polhavet, der vannets temperatur ved havbunnen er lav, kan imidlertid gasshydrat forkomme allerede på 300 meters vanndyp, en dybde som en finner over store deler av Barentshavet. Etter hvert som jorden varmes opp, blir gasshydrater i arktiske områder stadig mer sårbare for tining, og plasseringen, konsentrasjonen og fordelingen av hydrat vil direkte påvirke strømmen

Ottar 342 – 2022 (4): 4–10

av karbon til havet og muligens atmosfæren. Ustabilitet i sedimenter og skråningssvikt på lokal og regional skala som fører til undersjøiske ras og mulige tsunamier som er forårsaket av gasshydrattining, er av økende betydning når vi mennesker utnytter havbunnsressursene under stadig større havdyp.

Gassmigrasjon i undergrunnen

Den vertikale strømmen av væske og gass gjennom marine sedimenter er en utbredt og dynamisk geologisk prosess som skjer på kontinentale marginer over hele verden. Vertikal strøm av væsker, spesielt gass, gjennom lagene under havbunnen kan påvises som avvikende signal på akustiske data (akustiske anomalier). På seismiske data blir de vertikale strømningsveiene gjenkjent som vertikale soner med kaotisk mønster. Disse sonene beskrives ofte som gass-skorsteiner ('gas chimney' på engelsk), utblåsningsrør ('pipes') og gass-skyer. Slik gass-strøm opp gjennom sedimentene skjer i de fleste

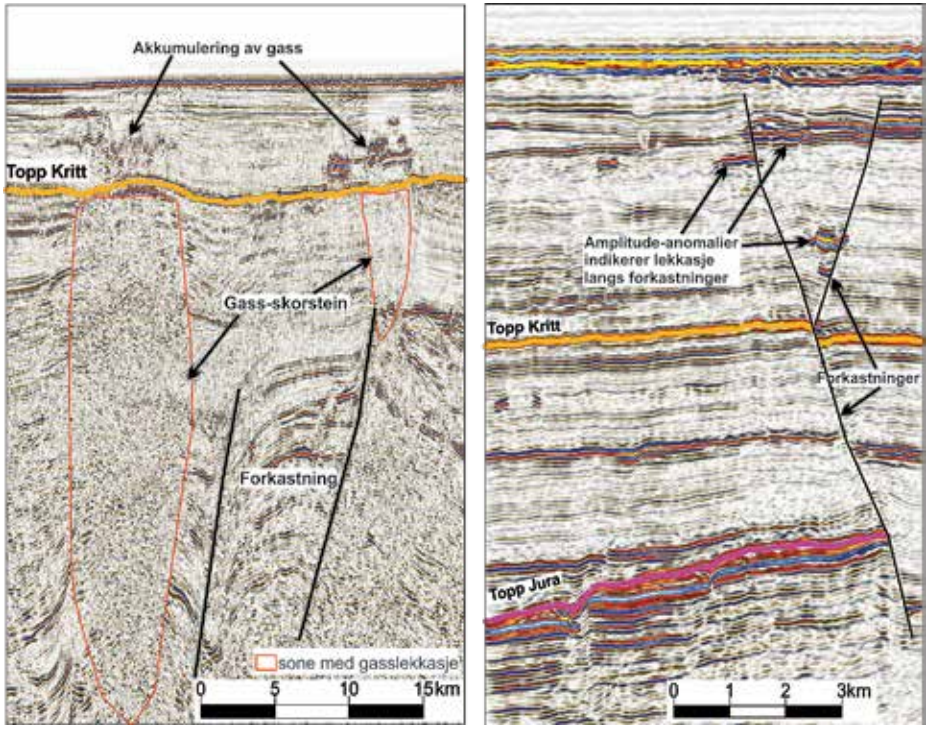


Venstre: tredimensjonal visualisering av gasslekkasjer på Vest-Svalbard marginen på 1200 m havdyp. Utsnittet som er ca. 10 km langt. De fargerike vertikale søylene viser akustisk respons fra gassbobler som siver ut i vannet fra havbunnen. Undergrunnen, som er eksempel på seismiske data viser vertikale strukturer med forstyrrete signaler som er forårsaket av væske- og gassmigrasjon gjennom havbunnen. De vertikale, forstyrrede strukturene er kjent som gass-skorstein ('chimney'). Gasshydrat danner seg i porerom til sediment fra gassen som migrerer oppover. Høyre: Seismisk eksempel fra et lekkasjesystem (øverst), og en enkelt modell som illustrerer de involverte prosessene. Fordi gasshydrat er avhengig av lav temperatur og høyt trykk vil hydrater forekomme i de øvre få hundre meter under havbunnen. Fasegrensen (stiplete linje) mellom gass og gasshydrat vil da simulere havbunnen. Når gasshydrat dannes, vil sedimentets permeabilitet for gasser og væsker avta, og gass som migrerer oppover fra dypere reservoarer vil akkumuleres under gasshydratene, som da vil opptre som feller for gassen. Disse gass-samlinger kan enkles identifiseres ved at de har kraftig amplitude (styrke) i seismiske data (høyre og venstre figur).

tilfeller over lang tid, ofte flere titalls til tusentall av år. Gass-skorsteiner kan da være kontinuerlig aktive eller ha mellomperioder av inaktivitet. Der man finner slike skorsteiner, dannes ofte gasshydrat i de øverste metrene under havbunnen.

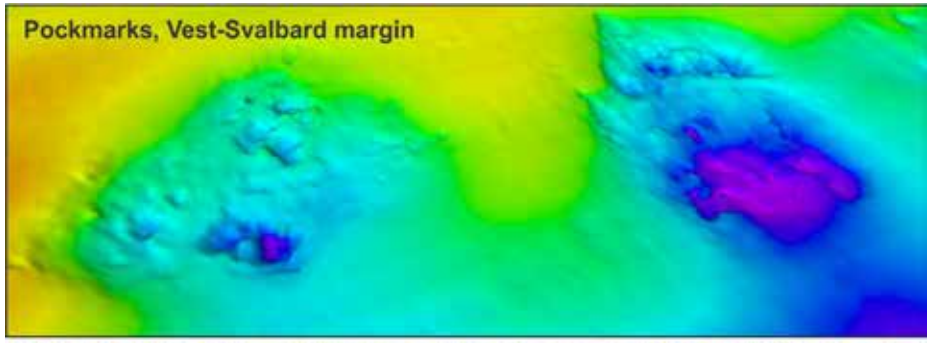
Avtrykk av gasslekkasje på havbunnen

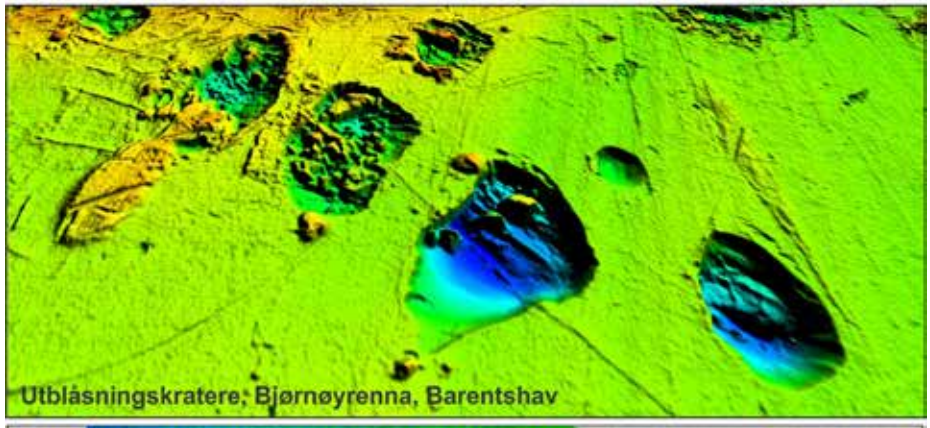
Lekkasje av gass til vannsøylen er påvist tusenvis av steder i Barentshavet og på kontinentalmarginen til Svalbard. Dette kan opptre som utsiving av gassbobler gjennom små hull i havbunn. Stedene der gass siver ut fra havbunnen kalles 'seeps'. Det er store variasjoner i gassutsivinger – hvilke type væsker og gasser de består av, omgivelser og assosiasjoner, og de er ikke enkle å karakterisere. Utsiving av gass kan påvirke havbunnens sedimenter, topografi, liv og sjøvann på ulike måter og i ulike skalaer. Gassutsivinger er komplekse systemer med overflateekspresjon, assosierte økosystemer (Sen med flere 2022) og kompleks undergrunnsstruktur. Mange 'seeps' rundt om i verden har vært produktive og kan opptre periodevis eller være kontinuerlig aktive over historiske perioder, og de kan etterlate spor av et fossilt system (Knies med flere 2022).

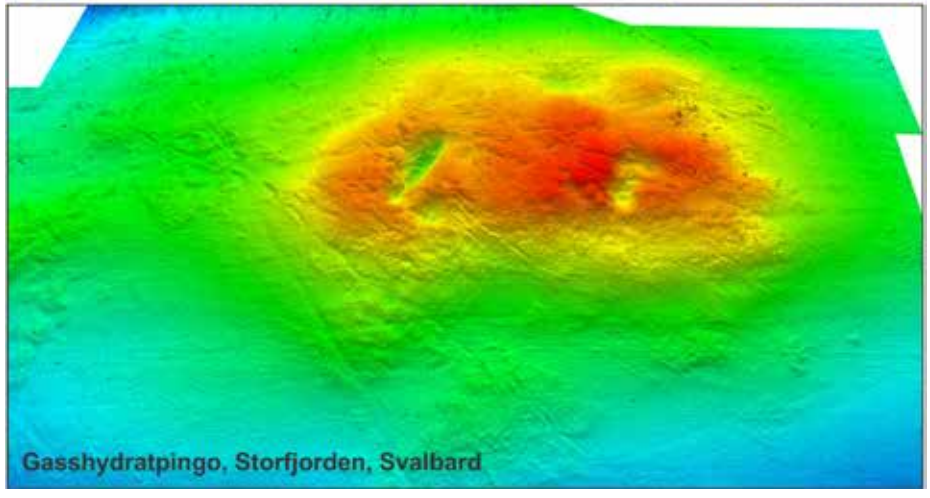


Seismiske data som viser eksempler på typiske væske- og gasslekkasjer fra dypere reservoarer i Barentshavet. Venstre: Gass-skorsteiner som viser gasslekkasje fra dypere kildebergarter eller fra toppen av en underliggende forkastning. Høyre: Gass-strøm gjenkjennes ved kraftige signalutslag (amplitudeanomalier) som ligger langs forkastningen og videre horisontalt utover i lagene fra forkastningen.

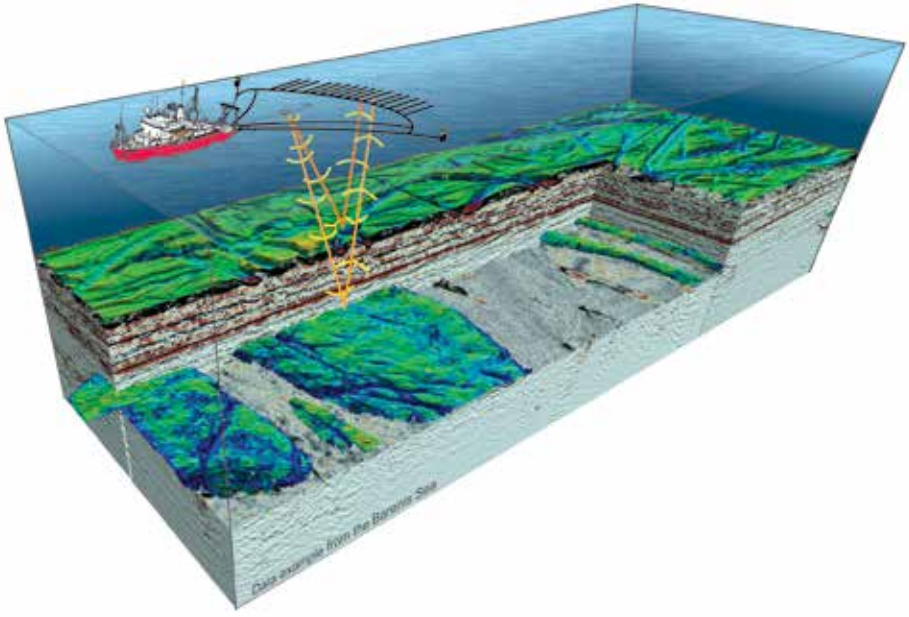
Gassutsivinger viser et bredt mangfold, men har en tendens til å ha noen felles likheter som kan være nyttige ledetråder i identifisering av slike utsivinger. Topografisk avvikende signaler, som gassutsivingsgroper (pockmarks), kratre eller hauger er de vanligste avtrykkene av fokusert væskestrøm gjennom havbunnen. Slik morfologi er forårsaket av lokal erosjon forårsaket av væskestrøm, oppbygning av karbonathauger, gasshydratdannelse, eller en kombinasjon av disse prosessene. Der gasshydrat dannes ved overflaten av havbunnen, vil undergrunnen ofte utvides og forme en haug som er spesielt kjent som 'gasshydratpingo'. Slike grunne gasshydratforekomster er betydelig mer sensitiv mot oppvarming av havet som følge av klimaendringene. Andre felleselementer er utvikling av visuelle sirkler (aureoler) rundt utsivingslokaliterer, som er biologiske og kjemisk påvirket av







Eksempler på typiske havbunnsstrukturer som naturlig lekker gass ut i havet.
Disse strukturene ble kartlagt med UiT's tredimensjonale (3D) seismisk system for høyoppløselige data (øverst og midten) og et høyoppløselig multistråle ekkolodd montert på en undervannsfarkost (nederst). Disse innsamlingssystemene ga oss eksepsjonelle data med betydelig større detalj enn en vanligvis får med akademiske innsamlingssystemer, og viste strukturene med vesentlig mer morfologisk variasjon. Disse dataene forbedret forståelsen av prosessene som driver slike systemer. Det koster mye å samle inn denne type data, men som senter for fremragende forskning har vi følt oss forpliktet til å levere det beste som er teknisk mulig (state-of-the art data).
Øverst: Pockmarks er groper på havbunnen. Slike er vanligvis noen få meter til titalls meter dype og noen få hundre meter i diameter. Slike groper oppstår når væske og gass siver ut og fjerner sediment. Midten: Kraterstrukturene, de største er 1000 m brede og 30 m dype, ble sprengt ut i berggrunnen av utblåsning av gass som var fanget under gasshydrater.
Nederst: En gasshydratpingo er en haug som er noen meter til titalls meter høy og noen få hundre meter i diameter. Haugen oppstår når gasshydrat dannes og undergrunnen utvides. De små fordypningene som kan sees på haugens overflate er steder der gass siver ut.



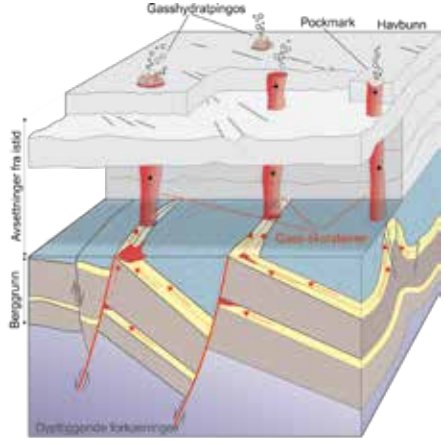
Tredimensjonal skisse som illustrerer prinsippet for UiT's 3D seismiske innsamlingssystem, her illustrert med dataeksempel fra Barentshavet. Flere korte hydrofonkabler med kort innbyrdes avstand er koblet til en krysskabel som slepes på tvers bak båten. Denne unike innsamlingsgeometrien gir oss høyoppløselige 3D seismiske data, noe som har forbedret vår forståelse for prosessene som kontrollerer gasslekkasjer.

gassutsivingen. I andre tilfeller av gasslekkasje ser en derimot ingen klare tegn til dette.

Komplekse systemer av metanlekkasje

CAGE har over ti år undersøkt en rekke utsivingssystmer, fra Barentshavet og rundt Svalbard ned til dyphavet ved midthavsryggen som strekker seg på langs midt i det nordlige Atlanterhavet. Her har vi brukt vårt eget utstyr for innsamling av høyoppløselige tredimensjonale (3D) seismiske data. Et slik innsamlingssystem er veldig unikt og finnes kun hos et annet akademisk institutt i verden. Disse 3D-dataene har gjort oss i stand til å kartlegge og visualisere strukturer av væske- og gasslekkasjer i stor detalj og har hjulpet oss å forstå slike systemer bedre. 3D dataene vi har samlet inn har for første gang kunnet vise nøyaktig hvor gassen beveger seg under havbunnen langs store gass-skorsteiner og hvor morfologisk kompleks gassutsivingen er både i utsivingsgroper og gasshydratpingoer.

Gass-skorsteiner er den mest utbredte typen av gassutsivingsstrukturer vi har observert under havbunnen. I mange tilfeller ser vi fra 3D dataene at disse kan relateres til store underliggende forkastninger, noe som tyder på en nær relasjon imellom dem. Siden utsivingsstrukturer er relatert til de dypere strukturelle elementene i regionen, ser det ut til at hydrokarbonakkumuleringen og migrasjonen er relatert til forkastningsaktivitet, og heving



Modellskisse som viser lekkasje av væske og gass, og illustrerer migrasjonsveier (røde og sorte piler) gjennom forkastninger, langs skråstilte lagrekker, feller av gass (røde områder) og langs gass-skorsteiner til havbunnen, der gassutsiving lager forskjellig morfologiske strukturer som pockmarks og gasshydratpingoer.

og senkning av jordskorpen gjennom istidene. Men de fleste fluidmigrasjonssystemer er komplekse og viser også andre komponenter, for eksempel gassmigrasjon langs skråstilte lagrekker og flere nivåer med feller av gass. For tiden er det over 1200 aktive gassutsivinger på 90–410 m vanndyp vest for Svalbard, og flere tusen er aktive i Barentshavet. Våre mange studier av utsivingsaktivitet og rollen til gasshydrater i utforming av metanutslipp har gitt oss et betydelig bedre bilde av kildene og prosessene til gassmigrasjon og deres uttrykk på havbunnen langs de arktiske marginene, men har samtidig gitt oss flere nye spørsmål.

Litteratur:

Sen, Arunima, Carrier, Vincent og Svenning, Mette Marianne. Økosystem som filter for metanlekkasjer. *Ottar* nr. 4/2022, Tromsø.

Knies, Jochen, Lepland, Aivo, Chand, Shyam, Løvø, Gudmund. Da Barentshavet lekket som en sil. *Ottar* nr. 4/2022, Tromsø.

Stefan Bünz er professor i geofysikk ved UiT – Norges Arktiske Universitet. Han har vært arbeidspakkeleder i CAGE for arbeidsgruppen om 'Gasshydrat og frie gassreservoarer'.
E-post: Stefan.Buenz@uit.no

Andreia Plaza-Faverola har doktorgraden ved CAGE, UiT – Norges Arktiske Universitet. Hun har vært forsker og prosjektleder ved CAGE arbeidsgruppen 'Gasshydrat og frie gassreservoarer'.Hun er nå førsteamanuensis ved Institutt for Geovitenskap, UiT, hvor hun underviser i geofysikk.
E-post: andreia.a.faverola@uit.no

Sunil Vadakkepuliyambatta tok doktorgraden ved CAGE, UiT – Norges Arktiske Universitet. Etterpå fortsatte han som postdoktor og forsker ved sentret. Han jobbet med gasshydratmodellering i arbeidsgruppen 'Gasshydrat og frie gassreservoarer'. Han jobber for tiden som seniorforsker ved National Center for Polar and Ocean Research, India.
E-post: sunilv@ncpor.res.in

Malin Waage har tatt doktorgraden ved CAGE, UiT – Norges Arktiske Universitet, og har deretter fortsatt som postdoktor ved sentret. Hun jobbet der med 3D og 4D seismisk tolkning i arbeidsgruppen 'Gasshydrat og frie gassreservoarer'. Hun jobber for tiden som seniorforsker ved Vestlandsforskning i Sogndal.
E-post: mwa@vestforsk.no

Istidenes betydning

Monica Winsborrow, Karin Andreassen, Henry Patton og Pavel Serov

Breer og iskapper har perfekte forhold under isen for lagring av drivhusgassen metan i frossen form, som gasshydrater. Et av målene i CAGE har vært å forstå hvordan slike store ismasser og drivhusgasser gjensidig har påvirket hverandre under tidligere istider i Barentshavet. Dette vil gi bedre anslag på mengden og stabiliteten av metan som er lagret under dagens iskapper, og hvordan disse vil kunne påvirke framtidig miljø og klima etter hvert som isen trekker seg tilbake.

Forskning ved CAGE har satt søkelys på den viktige rollen isdekker har spilt for lagring av store metanreservoarer i bergarter og sedimenter under isen. Vår forskning i Barentshavet viser hvordan store ismasser har skapt perfekte forhold for lagring av metan som gasshydrat under isen, og som har ført til områder med storskala, fokuserte metanutslipp etter isen trakk seg tilbake. I en del områder har brå tining av gasshydrat-reservoarer etter istiden forårsaket så kraftige metanutblåsninger at de har sprengt ut hundrevis av kratre på havbunnen. Flere av disse kratrene er opp til 1000 m i diameter, opptil 30 m dype, er sprengt ut i berggrunnen, og de lekker fremdeles metangass til sjøen og trolig også atmosfæren.

Fordi store ismasser tidligere har dekket store deler av Arktis, kan vi forvente å finne tilsvarende områder med kratre og storskala metanutslipp i andre områder som har vært dekket av is, som Grønlands kontinentalsokkel, Canada og Russland.

Og hva med dagens store iskapper? Hvor mye metanhydrat er det lagret under isen i Antarktis og på Grønland? Og hvor utsatte er disse frosne metanreservoarene for å tine og lekke metan til miljøet og atmosfæren når oppvarmingen i polarområdene skjer stadig raskere?

Iskapper i endring

Iskapper er store isbreer, ofte mer enn 1 km tykke, som hviler på underliggende landområder eller er grunnstøtt på havbunnen. Disse må ikke forveksles med sjøis, som for eksempel isen på Nordpolen, som bare er noen få meter tykk og som flyter på havoverflaten.

En kan lett tenke på iskapper som faste, ubevegelige deler av jorda. I virkeligheten er de aktive, dynamiske, i konstant endring, og de spiller en viktig rolle i klimasystemet gjennom global utveksling av vann, energi og karbon. Særlig viktige er de deler av iskappene som kalles isstrømmer, elver av is, som kan flyte med en hastighet på flere kilometer i året. Fordi de beveger seg så raskt sammenlignet med resten av iskappene er det disse iselvene som drenerer mesteparten av is, vann og løsmasser som forflyttes fra iskappenes indre områder til deres marginer. For eksempel er det beregnet at 90 % av is og sedimenter som fjernes fra det Antarktiske isdekket transporteres av isstrømmer. Derfor vil endringer i isstrømmenes bevegelse og hastighet lett kunne påvirke den totale stabiliteten til et isdekke.

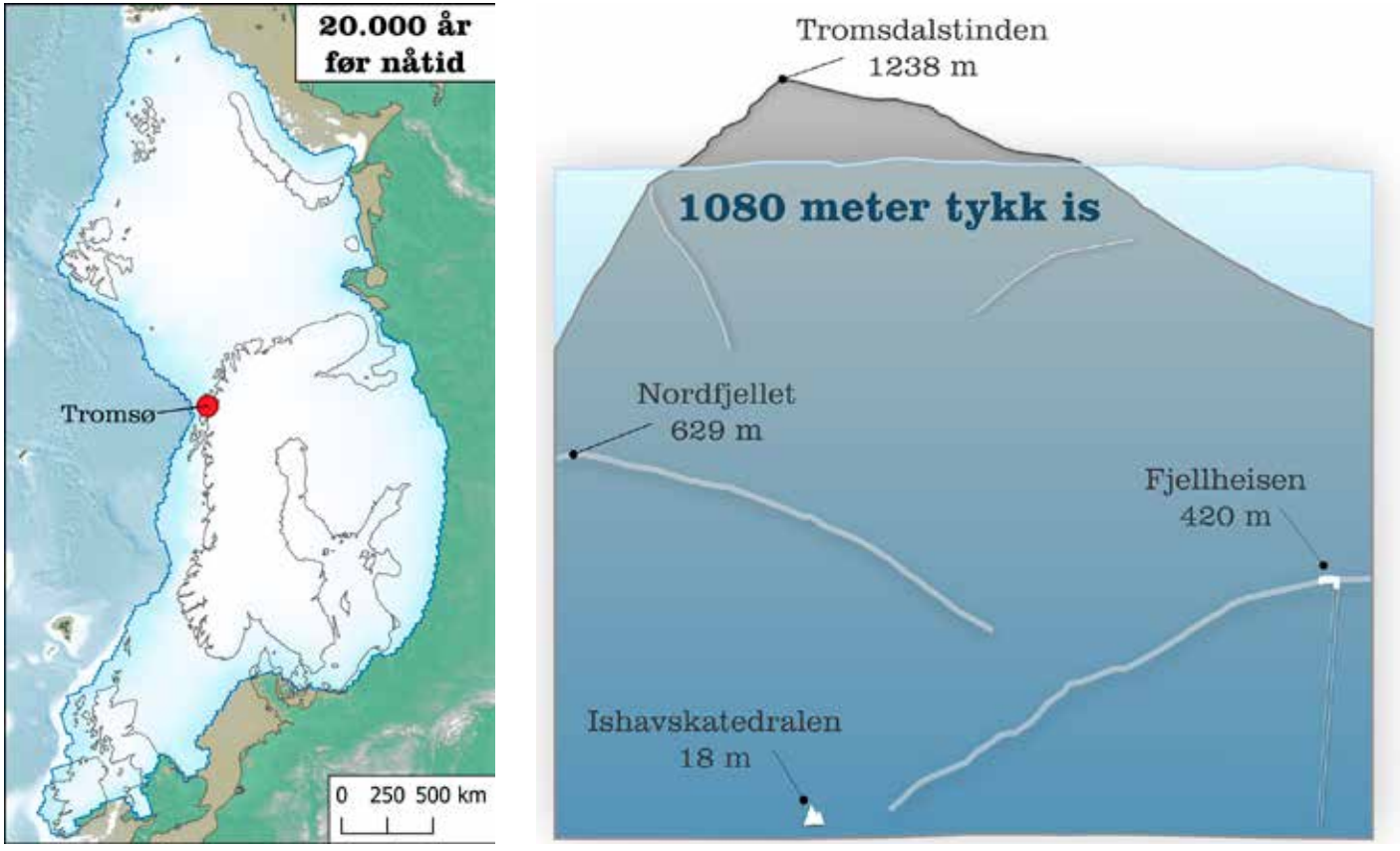
Isstrømmer og iskapper er ekstremt sensitive for temperatur-endringer i havene og i atmosfæren. De siste tiårene har global oppvarming forårsaket utstrakt smelting av isdekker og ført til endringer i havnivå, havsirkulasjon og økosystem. I 2019 forsvant rekordhøye 532 milliarder (10^9) tonn med is fra Grønlands

Ottar 342 – 2022 (4): 12–17

iskappe, mens det i 2021 regnet på toppen av Grønlands iskappe (3216 meter over havet) for første gang siden målingene startet i 1950. Klimaforskere erkjenner nå at jordas iskapper smelter ned mye raskere enn forutsagt.

Metan-oppsamling under (tidligere) istider

Kvartærperioden, som omfatter de siste 2.6 millioner år av jordas historie, kjennetegnes av naturlige, hurtige endringer der klimaet har skiftet mellom kalde tider, istider og varmere faser, mellomistider. Norge har de siste 2.6 millioner år vært rammet av over 40 istider. Under istidene har store iskapper dekket store deler av nordvest Europa (Det Eurasiske Isdekket), Nord-Amerika



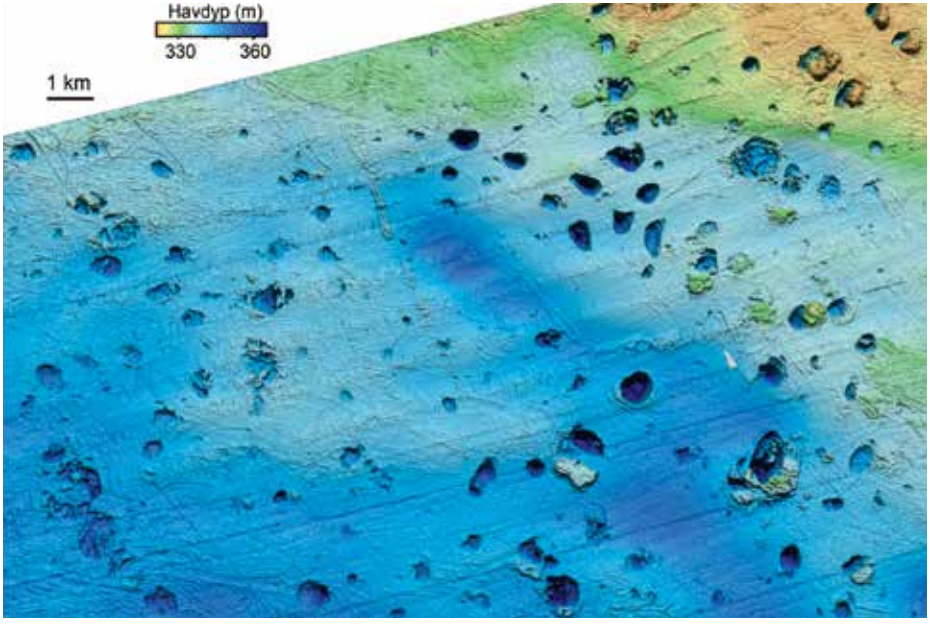
Det Eurasiske Iskappekompleks, som hadde sin maksimale utbredelse for ca. 20.000 år siden (hvite område til venstre) dekket store deler av de britiske øyer, Fennoskandia (Norge, Sverige, Finland og nordlige Russland), Barentshavet og Svalbard. De grønne områdene er dagens land-områder. De brune områdene er i dag havområder, men var for 20.000 år siden tørre landområder. Iskappen var på det tykkeste ca. 2700 m tykk over Botnviken. Selv om Tromsø var nær ismarginen i vest, var området begravd av over 1 km tykk is (til høyre) slik at kun de høyeste toppene, som Tromsdalstiden, stakk opp over breoverflaten.

Illustrasjoner: Henry Patton

og Patagonia, i tillegg til de områdene som i dag er dekket av ismasser, Antarktis og Grønland. Kvartærperioden omtales ofte som «Istiden».

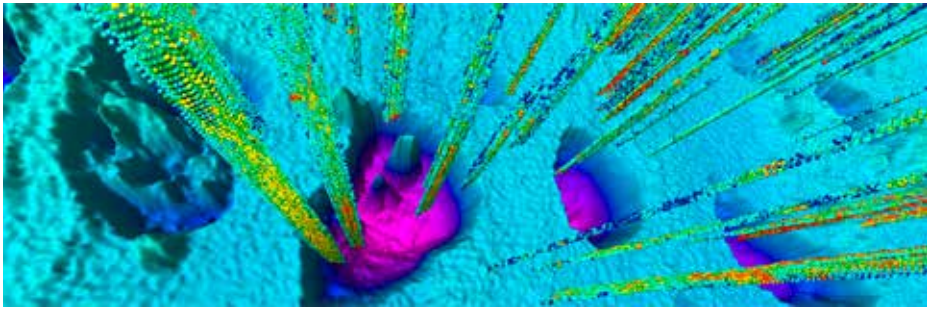
Framvekst av så store ismasser har påvirket jordas landskap mye. Isbreer er blant de mest effektive aktører i utforming av landskap i jordas historie. Mange av de mest karakteristiske landskaps-formene en ser i Tromsøområdet i dag er i høy grad formet av ismasser. Gjennom gjentatte istider har store, tykke ismasser gravd ut dype daler og fjorder over hele Norge, som til eksempel Tromsdalen, Dividalen og Sognefjorden. Landmassene som isen gravde ut (eroderte) ble deretter dumpet nedstrøms av isen i tykke avsetninger utafor bremarginene, og dannet flere steder store delta-avsetninger foran daler og fjorder, som for eksempel de store deltaterrassene vi ser langs dalsidene på Breivikeidet, ei lita kystbygd i Troms.

I tillegg til å grave ut daler og fjorder, utøvde de tykke ismassene stor vekt-belastning på jordas skorpe. Kombinasjonen av høyt trykk fra ismassene og lave temperaturer under isen ga perfekte forhold for lagring av metangass under isen i frossen form, som gasshydrater. I Barentshavet og Nordsjøen, der store mengder av metangass i dag lekker opp fra dypere petroleumsreservoarer via forkastninger og sprekker i berggrunnen, dannet det seg tykke lag med gasshydrater under isdekkene. Både gasshydratene og



Skyggerelieff kart av havbunnen sørøst for Bjørnøya i Barentshavet konstruert fra multistråledata samlet inn med UiT sitt Forskningsfartøy FF Helmer Hanssen. CAGE forskere har kartlagt hundrevis av havbunnskratre en rekke steder i Barentshavet. De største kratrene på kartet over er rundt 1 kilometer vide og de ble sprengt ut i berggrunnen av metanutblåsninger for omtrent 12.000 år siden. Modifisert etter Andreassen og medforfattere (2017).

Illustrasjon: Karin Andreassen



Multistråledata som viser boblestrømmer av metanbobler som gul-røde søyler som står opp fra havbunnen viser at de store havbunnskratrene, som ble dannet av metanutblåsninger for omtrent 12.000 år siden fremdeles lekker metangass.

Illustrasjon: Andreia Plaza Faverola

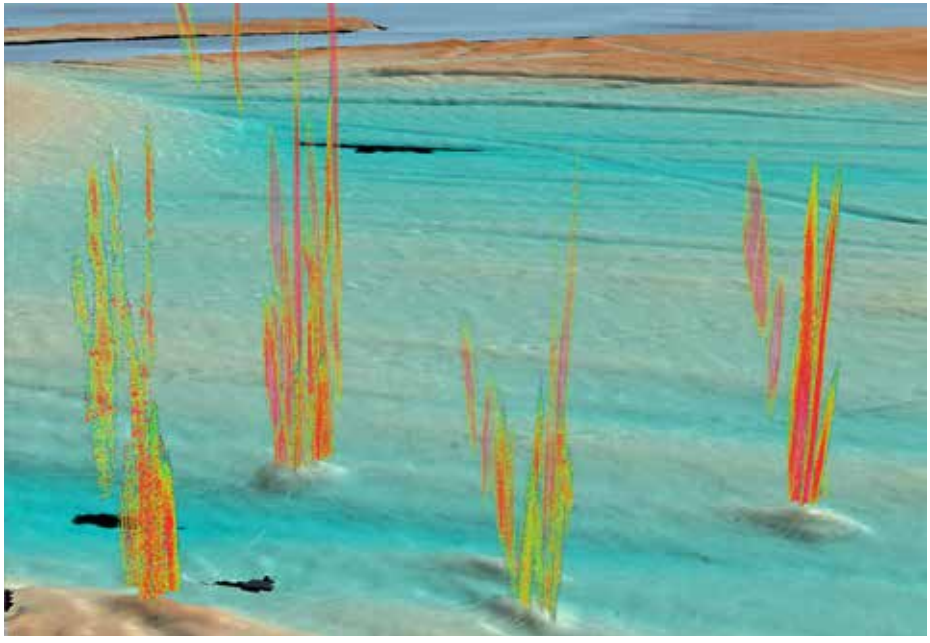
ismassene dannet effektive forseglinger for gasslekkasjer, noe som førte til anrikning og oppsamling av metan under isen.

Gasshydratpingoer, gigantiske kratre og storskala metanlekkasjer

For 12.000 år siden, da jordas akse bikket slik at den nordlige halvkule kom nærmere sola og temperaturene steg, endte siste istid, og de massive ismassene smeltet bort, bortsett fra over Antarktis og Grønland som fremdeles har store iskapper. Vår forskning viser at da iskappene smeltet og trykket fra de tykke ismassene forsvant, tinte etter hvert også gasshydratene som tidligere lå under isen, og disse ble omdannet til metan i gassform.

Metan i gassform tar opptil 164 ganger større plass enn tilsvarende mengde av metan i gasshydrat-form. Etter som gasshydratene tinte, gasshydratlagene ble stadig tynnere, og ansamlingene av metangass under den stadig tynnere gasshydratskorpen økte, hevet havbunnen seg opp til store hauger av metanhydrat og metangass, såkalte gasshydratpingoer. Etter hvert kollapset gasshydratpingoene og gassboblene poppet ut som fra champagneflasker, og boblet fra havbunnen og ut i sjøen, og trolig også til atmosfæren. Avtrykk fra disse dramatiske metanutblåsningene fins i dag som mengder av gigantiske kratre på havbunnen flere steder i Barentshavet.

Selv om de gigantiske havbunnskratrene ble dannet for ca. 12.000 år siden, så lekker de fortsatt i dag store mengder metangass. Denne metangassen kommer trolig fra underliggende gasshydrater som fremdeles tiner, i tillegg til gass som strømmer opp langs forkastninger og sprekker direkte fra dypere petroleumsreservoarer. På våre forskningstokt har vi oppdaget at det på havbunnen i Barentshavet fremdeles er mange gasshydratpingoer som ennå ikke har kollapset og som lekker store mengder metan. I et stadig varmere Arktis vil disse mest trolig kollapse og gi økte metanpulser til havet og trolig også atmosfæren.

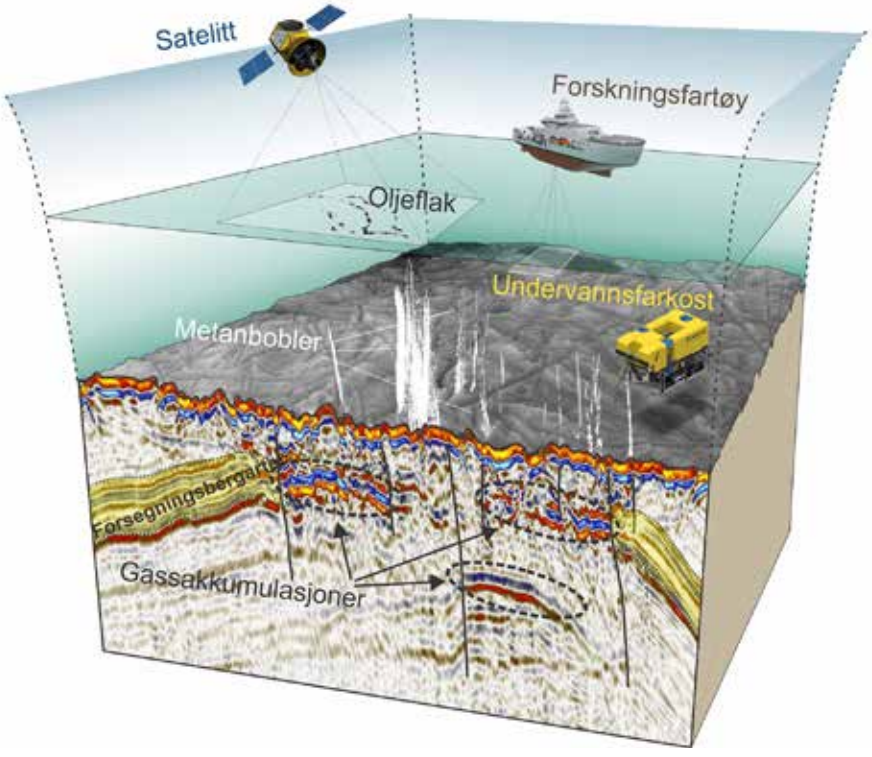


Multistråledata som viser boblestrømmer av metanbobler som gul-røde søyler som står opp fra forhøyninger, gasshydratpingoer på havbunnen sør for Svalbard.

Illustrasjon: Pavel Serov

Storskala lekkasje av metan og olje fra dypere petroleumsreservoarer

Gjennom kvartærtiden, de siste 2.6 millioner år, har gjentatte framstøt og tilbaketrekning av iskapper fjernet mengder med sedimenter og forårsaket store endringer i landskapet. Denne erosjonen har vært særlig utstrakt der en har hatt isstrømmer.



Seismisk profil viser gassakkumulasjoner som ligger rett under havbunnen. Forseglingsbergartene som før istidene dannet et topplag som holdt gassen på plass i reservoarene, ble gravd vekk av isen under istidene. I dag er det ingen forsegling over gassakkumulasjonene, som derfor lekker store mengder av gass og olje til havbunnen, gjennom vannsøylen og til havoverflata, der vi kan se store ansamlinger av oljeflak. Vi kartlegger utbredelse av oljeflak på havoverflaten ved hjelp av satelittbilder. Boblestrømmer av olje og gass, markert som hvite søyler på figuren, kartlegges med ekkolodd og verifiseres ved hjelp undervannsfarkoster som styres fra forskningsfartøy.

Illustrasjon: Pavel Serov

Til eksempel har isstrømmer i det sørlige Barentshavet gravd vekk opp til 3 km med berggrunn og løsmasser, og dumpet disse ned i dyphavet utafor iskappenes marginer, der de har dannet store vifter av sedimenter, noen av disse større enn Islands areal. Den massive utgravingen av berggrunn har ført til at petroleumsførende lag, som en gang var dypt begravd og forseglet, nå befinner seg rett under havbunnen og kan lekke rett ut i havet. I slike områder har CAGE forskningsekspedisjoner påvist enorme mengder med metan og olje som lekker direkte fra disse grunne petroleumsrike lagene. Ved å bruke fjernstyrte undervannsfarkoster (ROVer) til å avbilde denne gjemte verden under vann, har vi observert kraftige strømmer av olje- og metan-bobler som stiger opp fra havbunnen og videre oppover i vannsøylen. Vi oppdager også stadig oftere at slike oljebobler strømmer gjennom hele vannsøyla og danner store oljeflak på havoverflaten, og at disse kan påvises med satelittbilder.

Mer forskning trengs for å utforske hvilke konsekvenser disse metan- og oljelekkasjene har for klima, da de er en ny og hittil ukjent kilde til drivhusgasser i atmosfæren, og hva de kan bety for sårbare Arktiske marine økosystem. Dette gjør oss også nysgjerrige på hva som skjer med metanlagrene som har samlet seg opp under dagens iskapper i Antarktis og på Grønland.

Hva skjer med metan som er lagret under dagens iskapper?

Beregninger viser at det trolig fins store mengder metan lagret under dagens isdekker i Antarktis og på Grønland, og vi kan observere at metan bobler ut foran isen som smelter stadig raskere ned. Likevel er ikke metanutslipp fra is og underliggende metanhydrater som tiner inkludert i prognoser for framtidig klima fordi vi vet for lite

om hvor mye og hvor raskt metan vil frigis til atmosfæren. Miljøet under dagens isdekker er blant de mest utilgjengelige steder på jorda, noe som gjør direkte målinger ekstremt utfordrende. Denne potensielle kilden for framtidige utslipp av drivhusgasser til atmosfæren fra en stadig varmere jord kan være viktig, særlig fordi de prosesser som er involvert ikke er inkludert i prognosene fra FNs klimapanel (IPCC) for framtidig global oppvarming.

Viktige spørsmål som gjenstår å svare på er: Hvor mye og hvor raskt vil metan lekke til havene og atmosfæren etter som iskappene i Antarktis og på Grønland smelter ned stadig raskere, og hvordan vil dette påvirke jordas framtidige miljø og klima? Et nytt Senter for Fremragende Forskning som nylig er tildelt av Norges Forskningsråd, Senter for is, Kryosfære, Karbon og Klima (Centre for ice, Cryosphere, Carbon and Climate - iC3) vil adressere dette. iC3 (2023-2033) ledes av CAGE-forskerne, Jemma Wadham og Monica Winsborrow.

Litteratur:

Karin Andreassen, Alun Hubbard, Monica Winsborrow, Henry Patton, Sunil Vadakkepuliy ambatta, Andrea Plaza-Faverola, Eythor Gudlaugsson, Pavel Serov, Alexey Deryabin, Rune Mattingsdal, Jürgen Mienert og Stefan Bünz 2017. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science* 256 (6341), 948-953.

Pavel Serov, Sunil Vadakkepuliyam batta, Jürgen Mienert, Henry Patton, Alexey Portnov, Anna Silyakova, Giulana Panieri, Michael L. Carroll, JoLynn Carroll, Karin Andreassen og Alun Hubbard 2017. Postglacial response of Arctic Ocean gas hydrates to climatic amelioration. *The Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS) 114 (24), 6215-6220.

Jemma L. Wadham, J.R. Hawkins, L. Tarasov, L.J. Gregoire, R.G.M. Spencer, M. Gutjahr, A. Ridgwell og K.E. Kohfoed 2019. Ice sheets matter for the global carbon cycle. *Nature Communications* 10:3567. Doi: 10.1038/s41467-019-113493-4.

Pavel Serov er postdoktor i CAGE, og har tidligere vært PhD-student i sentret. Han har fokusert på utforskning av koblinger mellom metanlekkasjer og dypere hydrokarbonreservoarer.
E-post: pavel.russerov@uit.no.

Monica Winsborrow er førsteamanuensis i paleoglasiologi og maringeologi ved UiT – Norges Arktiske Universitet. Hun har vært ansatt i CAGE siden 2014. Siden 2017 har hun vært assisterende direktør ved sentret, og samtidig ledet arbeidspakke WP2, som omhandler istidenes betydning for gasshydrater og metanlekkasjer.
E-post: monica.winsborrow@uit.no.

Karin Andreassen er professor i marin geologi og geofysikk ved UiT – Norges Arktiske Universitet. Hun har vært direktør for CAGE siden 2017, og var i perioden 2013–2017 assisterende direktør i sentret.
E-post: karin.andreassen@uit.no.

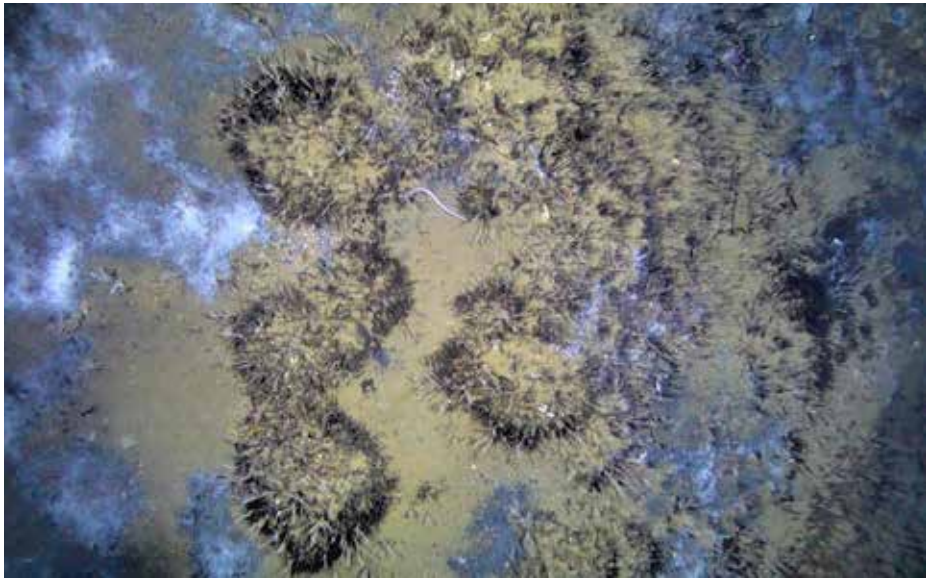
Henry Patton er forsker i CAGE, og har tidligere vært postdoktor i sentret. Han har hatt en sentral rolle i utvikling av metodikk for numerisk modellering av isdekkene som dekket store deler av nordvest Europa gjennom kvartærtiden (de siste 2.6 millioner år).
E-post: henry.patton@uit.no.

Økosystem som filter for metanlekkasjer

Arunima Sen, Vincent Carrier, Mette Marianne Svenning

På havbunnen ligger store mengder metan frosset i gasshydrater. I mange områder bobler denne potente klimagassen frem. Vi kaller disse områdene med gassutsiving for kalde ventilasjonssystemer. Der gir metan liv til mikroorganismer og dyr. Mikroorganismer som livnærer seg gjennom kjemiske reaksjoner lever alene eller sammen med dyr i disse biologiske oasene på havbunnen.

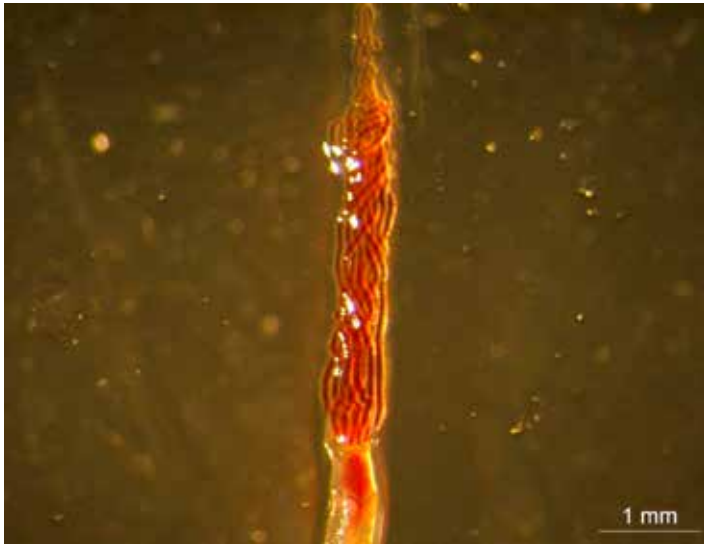
I det dype og kalde Arktis finner vi metan i små lommer under havbunnen. Utsiving av denne gassen benevnes kalde ventilasjonssystemer. Havbunnssediment over disse metanlommene vil derfor inneholde store mengder metangass. Til tross for at oksygen bare finnes i de øverste centimeter av sedimentet, finnes det store mengder med mikroskopiske organismer-mikroorganismer som lever her. Både bakterier og arker (encellede mikroorganismer, Bacteria og Archaea på engelsk) kan utnytte metangass som energikilde. Bakteriene bruker oksygen til dette og arkene bruker andre kjemiske forbindelser. Ofte er omsetningen av metangass koblet på en annen kjemisk reaksjon som produserer hydrogensulfid. Denne gassen kan høres ukjent ut, men er velkjent for mange – spesielt om man glemmer å tømme kjøleskapet før en lengre periode hjemmefra. Dette er lukten av råtten mat! Den store forskjellen er selvsagt at mikrobene som bryter ned kjøleskapsmaten din har tilgang til oksygen. Allikevel får mikrobene i sedimentet til en prosess som på samme måte fører til produksjon av hydrogensulfid. I likhet med metan siver også hydrogensulfidet ut i sedimentet, hvor det blir brukt av andre mikrober. Her skal ikke mye gå til spille!



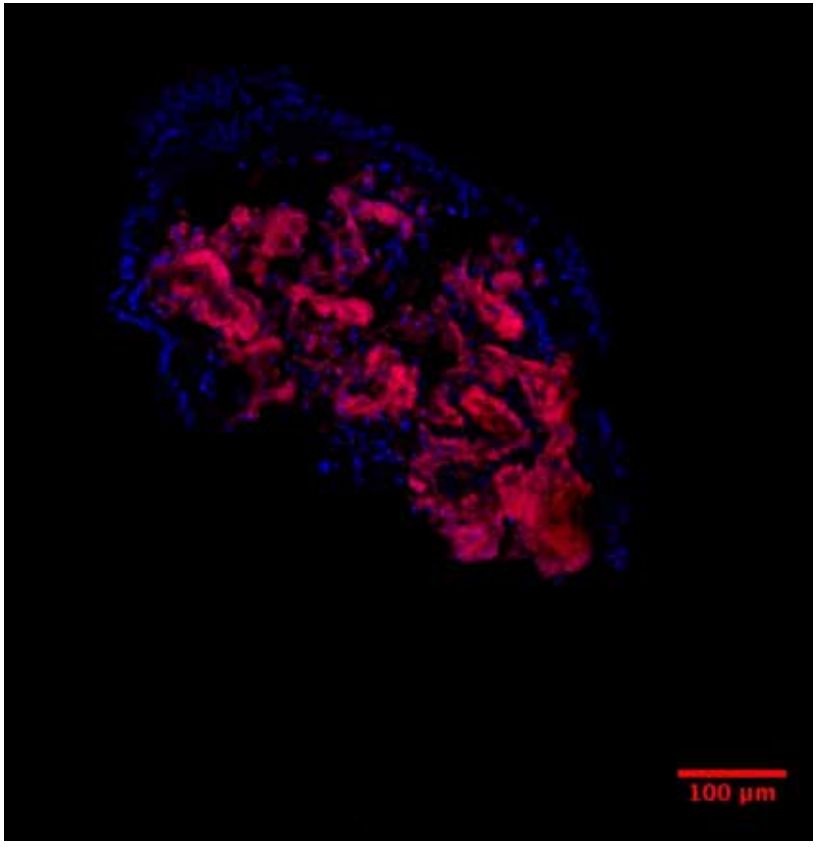
Matter/felt av børstemarker (Oligobrachia). De svarte, hårlignende børstemarkene, kan danne tykke, tette matter som strekker seg over mange kvadratmeter, og kan også danne klumper som vist til høyre. De blå-hvite flekkene er matter av kjemosyntetiske mikroorganismer.
Foto: CAGE, UiT og NORCRUST, NGU

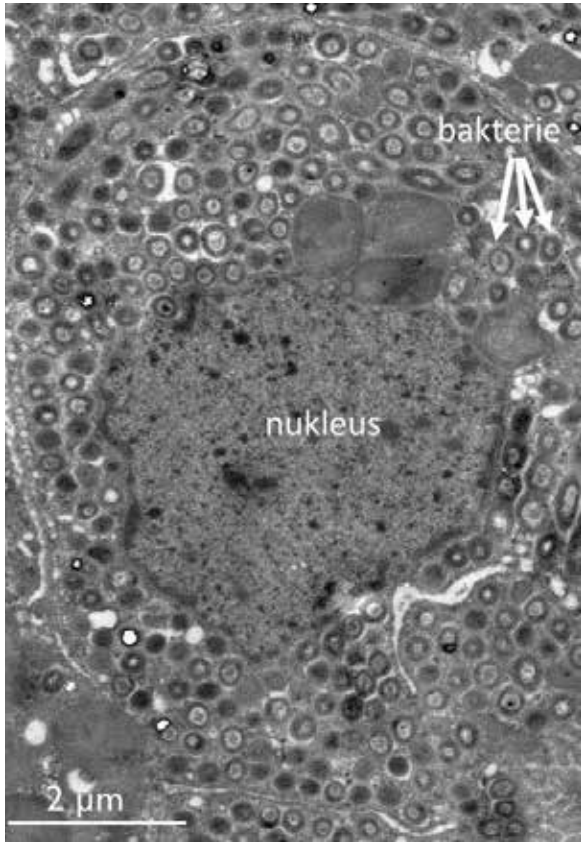
De fleste har hørt om fotosyntese, og vet at planter utnytter prosessen til å produsere mat fra sollys, vann og karbondioksid. Men dette er ikke den eneste måten å produsere mat på. Mikroorganismer kan lage mat med kjemikaler, slik som metan og hydrogensulfid – i stedet for lys. Vi vet nå at disse kjemosyntetiske mikroorganismene som utnytter slike kjemiske forbindelser er veldig vanlige, spesielt rundt kalde ventilasjonssystemer med metanlekkasjer. Her kan de dekke flere kvadratmeter på havbunnen. Dermed legger de grunnlaget for et litt annerledes økosystem som kan eksistere helt på egenhånd – uten sollys, oksygen eller fotosyntese se foto side 18.

Nærbilde av lite område på havbunnen dekket av børstemark.
Foto: CAGE, UiT og NORCRUST, NGU



Nærbilder av en børstemark som viser de karakteristiske røde tentaklene den har. På bilde av havbunnen ser de sorte ut på grunn av de mørke tubene rundt marken (bildet til venstre). Børstemarken er avhengig av kjemosyntetiske bakterier som lever inne i den.
Fotos: Arunima Sen og Emmelie Åström





Inne i børstemarken. Bildet til venstre viset et tverrsnitt av børstemarken med genetiske markører hvor rødt samsvarer med DNA fra kjemosyntetiske bakterier og blått er fra dyreceller. Med andre ord er blått selve ormen, og rødt er bakteriene inne i ormen. Hvor tett det røde området er, samsvarer med hvor tett pakket den delen av ormen er med bakteriene. Til høyre er et transmisjonselektronbilde (TEM) av en enkelt celle av børstemarken. Dette bildet ble tatt med elektroner i stedet for lysbølger så det er mulig å se en enkelt celle. Den store strukturen i midten er kjernen til børstemarken og rundt den, er de små sirkulære bakteriene, som er det typiske utseendet til sulfidoksiderende bakterier. Bildene er fra Arunima Sen og medforfattere (2018).

Symbioser mellom mikro- og makrofauna

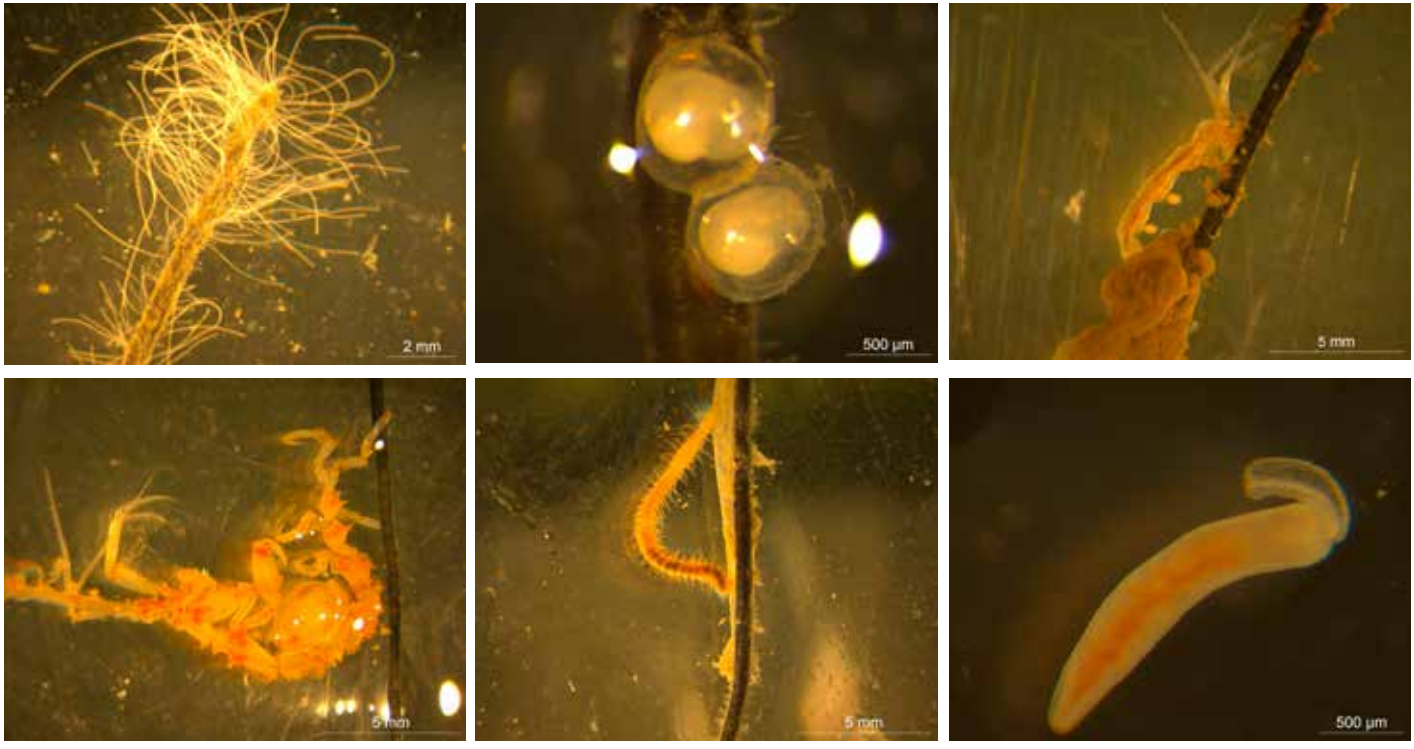
Mikrober er ikke de eneste organismene vi finner i kalde ventilasjonssystemer. Her finner vi den tradisjonelle økosystemstrukturen med primærforbrukere, rovdyr, og åtseldyr. I tillegg inneholder kalde ventilasjonssystemer også en ekstra gruppe dyr som har utviklet et helt spesielt forhold til kjemosyntetiske mikroorganismer. Disse dyrene er verter for kjemosyntetiske bakterier og gir dem sulfid, metan og oksygen. Til gjengjeld gir bakteriene maten de lager til vertsdyrene. Denne typen gjensidig fordelaktige forhold, eller symbiose,

mellom dyr og mikroorganismer er et unikt kjennetegn på kalde ventilasjons økosystemer med metanlekkasjer.

I Arktis er disse økosystemene preget av hårete ormer som kalles børstemarker, og partnerskapet er så fordelaktig at børstemarkene er de desidert mest tallrike dyrene ved arktiske metanlekkasjer. Der kan de telle tusenvis, bare innenfor en kvadratmeter (foto side 19, øverst).

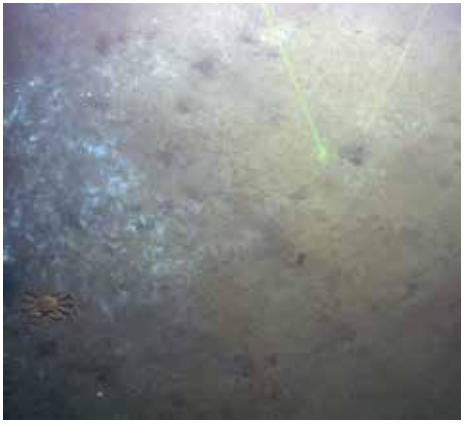
Siden børstemarkene skaper en skog på havbunnen og endrer sedimentkjemien ved å ta opp sulfid og oksygen, kaller vi dem økosystemingeniører. I utgangspunktet er de nøkkelarter i kalde ventilasjonssystemer, og deres tilstedeværelse påvirker både biologien og de fysiske forholdene til dette spesielle økosystemet (foto side 19, nederst og foto side 20 øverst).

Store enger med børstemarker er veldig karakteristiske for kalde ventilasjonssystemer med metanlekkasjer, og de inneholder et utrolig mangfold. De hårete markene fungerer på samme måte som trestammer, og en rekke dyr klamrer seg til dem (foto denne side).



Et utvalg av skapningene som lever på rørene til børstemarker. På alle bildene er den mørke linjen røret til en enkelt orm. Fra venstre til høyre og topp til bunn: Filamentøse (antagelig kjemosyntetiske) bakterier, foraminifera, caprellid krepsdyr, to caprellider, polychaete orm og en annen polychaete orm.

Fotos: Arunima Sen og Emmelie Åström



En sjøedderkopp Nymphon hirtipes og beitende snegler ved et ventilasjonssystem utenfor Lofoten-Vesterålen. Sneglene er de små, fargesterke prikkene. Hvis du ser nøye etter, kan du se spiralene på skjellene deres. Hver snegle er omtrent 1 mm i størrelse, til sammenligning er sjøedderkoppen omtrent på størrelse med en håndflate. Bildet til høyre viser en snøkrabbe som beiter på bakteriematte på havbunnen. Laserne på bildet (grønne prikker) er 20 cm fra hverandre.

Foto: CAGE, UiT og NORCRUST, NGU

Beiting, predasjon og fangst

Ved kalde ventilasjonssystemer med metanlekkasjer beiter små snegler på størrelse med et knappenålshode på mikroorganismer (foto, øverst venstre). Snegler har spesielle, grove tunger som lar dem skrape mikrober av overflater og inn i munnen. Akkurat som når en katt river huden din mens den slikker deg. Andre dyr lever sannsynligvis også av mikroorganismer her, men de er små og notorisk vanskelige å få tak i. Det har blitt observert snøkrabbe ved metanlekkasjer i Barentshavets hvor det ser ut til at de beiter på mikrobielle matter (foto, øverst høyre). Uten riktig prøvetaking er det umulig å bekrefte denne adferden, men det er mulig at du spiser mikrober fra

Pandalusreke ved et kaldt ventilasjonssystem i Barentshavet (bildet til venstre). Dette er de samme rekene vi spiser, og de kan være mange i antall her. Til høyre er en annen spiselig art, Atlantisk torsk, som flokker seg ved gasslekkasjene, roter opp sedimentene på havbunnen, og gjør det vanskelig å ta prøver. Laserne (grønne prikker til venstre og røde til høyre) er 20 cm fra hverandre.

Foto: CAGE, UiT og AMOS, NTNU

arktiske metanlekkasjer gjennom din neste krabbemiddag!

I stedet for aktivt beite på mikroorganismer, har noen dyr utviklet en mer passiv måte å beite på maten som er tilgjengelig ved kalde ventilasjonssystemer. De filtrerer vannet rundt dem og beholder eventuelle matpartikler som næring. Muslinger og blåskjell gjør dette, og noen dyr, som anemoner, bruker små harpuner for å spidde dyr som flyter forbi. Rovdyr og åtseldyr, som tilhører høyere nivåer i næringskjeden, hiver seg også med, så kalde ventilasjons systemer er komplette økosystemer som dekker hele den trofiske pyramiden. Arktiske ventilasjons systemer er faktisk, fra et artsperspektiv, ikke annerledes enn den omkringliggende havbunnen. Det er ingen spesialiserte arter ved kalde ventilasjonssystemer, bare vanlige dyr som du kan finne andre steder på havbunnen. Dette er et spesielt trekk ved arktiske metanlekkasjer.
I andre deler av verden har ventilasjonssystemer en blanding av både vanlige havbunnsarter og arter som utelukkende finnes ved ventilasjonssystemer. I Arktis har derimot de kalde ventilasjonssystemene av årsaker som forskerne fortsatt prøver å finne ut av, samme type dyr som resten av havbunnen. Det som er annerledes er imidlertid mengden dyr. På grunn av at det er så rikelig med mat ved de kalde ventilasjonssystemene med metanlekkasje, samles dyr der, og skaper biologiske oaser midt i den relativt golde havbunnen rundt. Stimer med torsk og reker henger også rundt disse oasene (se foto side 22, nederst), så legg til lutefisk og rekesmørbrød på listen over mat som er knyttet til arktiske metanlekkasjer!

Konklusjon

Et oppvarmet hav er en av de store utfordringene verden står overfor i dag. Endringer i temperaturer kan føre til at metanhydrater i Arktis oppløses, noe som kan pumpe mer metan ut i havet og videre i atmosfæren og forverre den globale oppvarmingen. Heldigvis er havbunnsbiosfæren godt rustet til å håndtere metanlekkasje. Mikrober og dyr jobber sammen i fantastisk synergi for å gjøre denne kraftige drivhusgassen om til mat. Det tomme havdypet blir et levende økosystem som myldrer av liv. Det er lett å avvise usynlige mikrober eller dyr med vanskelige latinske navn, men de har en nøkkelrolle som biofilter for metanlekkasjer.

Litteratur:

Arunima Sen, Sébastien Duperron, Stéphane Hourdez, Bérénice Piquet, Nelly Léger, Andrey Gebruk, Anne-Sophie Le Port, Mette Marianne Svenning og Ann. C. Andersen. 2018. Cryptic frenulates are the dominant chemosymbiotrophic fauna at Arctic and high latitude Atlantic cold seeps. PLoS ONE 13(12): e0209273. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209273

Arunima Sen er førsteamanuensis i arktisk marin biologi ved UNIS, Svalbard. Hun var ansatt som forsker i CAGE fra 2016 til 2019 og studerte dyr på havbunnen ved og rundt ventilasjonssystemer med metan.
E-post: arunimas@unis.no.

Mette Marianne Svenning er professor i biologived UiT – Norges Arktiske Universitet. Hun er leder av arbeidspakke 3 (WP3), CAGE som studerer mikrobiologi og biologi på havbunnen, ved og nært, metanlekkasjer.
E-post: mette.svenning@uit.no

Vincent Carrier er tidligere PhD student i CAGE. Han studerte biodiversitet av mikroorganismer i og rundt kalde ventilasjonssystemer med metangass og hvordan metan påvirker tilstedeværelsen av nøkkelorganismer som biofilter for denne klimagassen.

Overvåking av metan i vannet

Benedicte Ferré, Knut Ola Dølven, Muhammed Fatih Sert og Manuel Moser

Mange er kjent med at metan i atmosfæren påvirker klimaet og at det slippes ut i forbindelse med både kjøttproduksjon fra drøvtyggere og i produksjon av olje og gass. Metan kan imidlertid også slippes ut i atmosfæren fra naturlige kilder, blant annet fra et stort, og lite kartlagt område, nemlig fra havet. Hvordan slippes metan ut? Har det alltid vært der og hvor ender det opp etter det er sluppet ut? På Senter for Arktisk gasshydrat, miljø og klima (CAGE) undersøker vi disse spørsmålene ved å ta målinger fra forskningsfartøy og ved å anvende moderne teknologi og modellering.

Utslipp av metan fra havbunnen ble først oppdaget av fiskere som observerte merkelige fakkel-liknende avtrykk i ekkoloddsignalene sine. At det de observerte var et verdensomspennende fenomen – nemlig metanbobler som lakk ut av havbunnen, var de ikke klar over.

Metan er en potent klimagass. Karbondioksid får hovedansvaret for de pågående klimaendringene, men metan har faktisk, på kortere tidsskalaer, en mye større evne til å absorbere varmestråling enn karbondioksid. Over en hundreårsperiode og for samme mengde atmosfærisk gass, har metan 25 ganger større klimaeffekt enn karbondioksid. Å kunne kvantifisere og predikere mengden metan i atmosfæren er derfor veldig viktig for å kunne forutse fremtidens klima. Vi vet mye om metanutslipp fra land og også delvis vann, men vi vet lite om utslipp fra havbunnen, hvordan dette varierer over tid og hvor stor del av dette utslippet som ender opp i atmosfæren.

Metanutslipp fra havbunnen i Arktis og noen viktige prosesser

Metan kan lagres i sedimentene i forskjellige reservoarer: Oppløst i vann som fyller porene i sedimenter, som fri gass eller i metanhydrat. Det er antatt at store mengder karbon er lagret som metanhydrater på kontinentalsoklene i Arktis. Tidligere har forskere foreslått at metan slippes ut av havbunnen i Arktis fordi metanhydrater går i oppløsning på grunn av økende havtemperaturer som følge av klimaendringer. Senere forskning har imidlertid vist at utslipp enkelte steder har pågått i flere tusen år (Berndt et al., 2014), selv om temperaturen ikke har økt i hele denne perioden. Forklaringen på dette er landhevning etter siste istid som fører til lavere vannstand og lavere trykk (Wallmann et al., 2018).

Endring i trykk kan også påvirke utslipp av metan på korte tidsskalaer som følge av tidevann. Her kan man se for seg en konstant tilførsel av metan til et øvre vannrikt sedimentlag. Metan i dette sedimentlaget er delvis løst opp i vannet som er i sedimentenes porerom (sedimentvannet) og delvis som fri gass i form av små bobler som siver mot havbunnen. Ved stigende tidevann, altså stigende trykk, vil mer gass oppløses i sedimentvannet og det blir mindre metan i bobleform. Dette fører til at mindre gass siver opp til sedimentoverflaten og ut i det overliggende vannet. Den øvre sedimentpakken kan slik holde på mer metan. På fallende tidevann, altså fallende trykk, vil sedimentvannet få dårligere evne til å holde på metan. Dette fører til mer bobler og mer metan som siver

Ottar 342 – 2022 (4): 24–29

ut av havbunnen. Denne effekten er observert flere steder, blant annet utenfor vestkysten av Canada (Römer et al., 2016).

En annen viktig prosess som kan endre utslipp av metan fra havbunnen i Arktis er tining av permafrost. Store deler av kontinentalsoklene i Polhavet har et øvre sedimentlag hvor sedimentvannet er frossent. Dette hindrer underliggende metan og metan som allerede er til stede i det øvre sedimentlaget i å sive ut av havbunnen. Opptining av det øvre sedimentlaget vil kunne frigjøre dette metanet.

Metantransport i vannkolonna

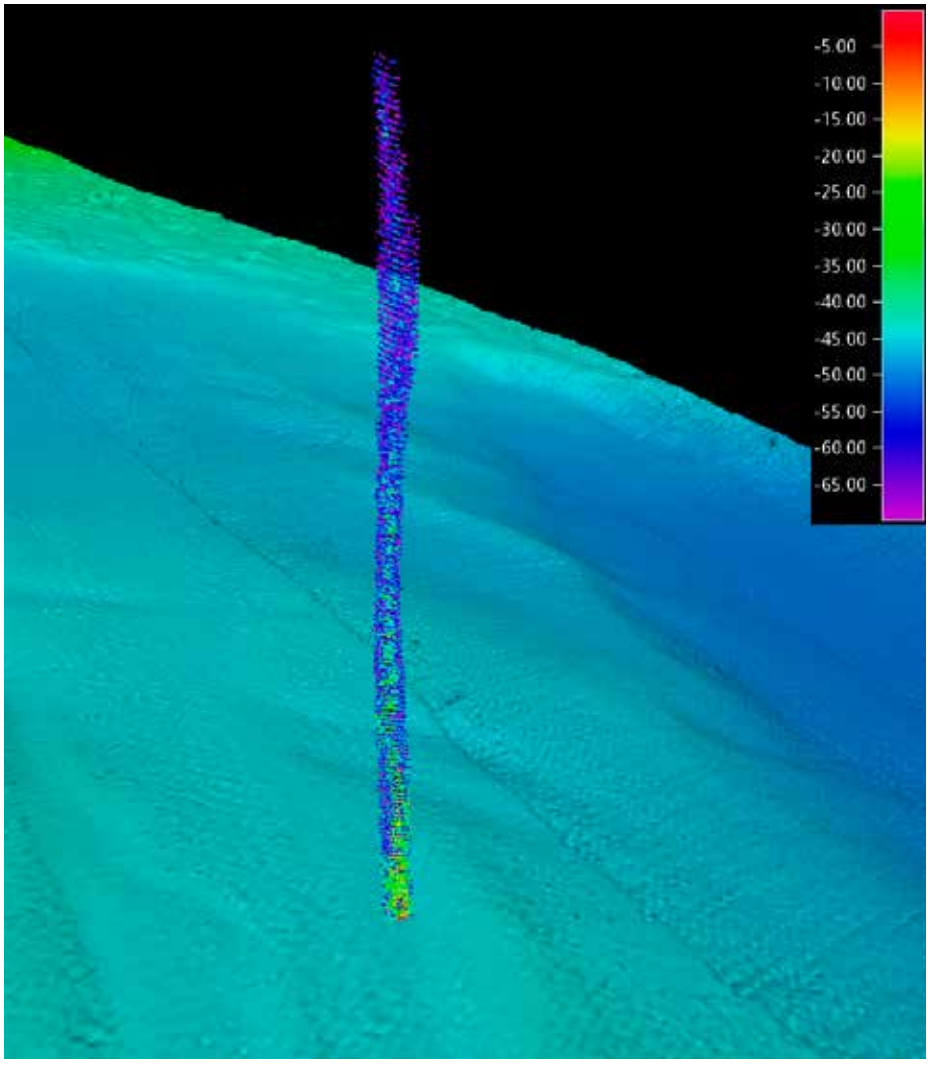
Hvis metan når toppen av sedimentpakken, det vil si havbunnen, kan det lekke ut via bobler (fri gass) eller oppløst i vann som siver ut av sedimentene. Oppløst metan som transporteres med havstrømmer blir utvannet og omdannet til karbondioksid av mikrober og selv om bobler stiger relativt raskt mot havoverflaten, (ca. 20 cm/s) er det ofte lite metan som faktisk slippes ut til atmosfæren. Dette skyldes at det er utveksling av gass mellom vannet og metanboblene, samt at boblene selv går i oppløsning. Flere studier har vist at selv i tilfeller hvor bobler når havoverflaten er utslippet av metan til atmosfæren veldig lavt. Dette skyldes at disse boblene har byttet ut metanet sitt med andre gasser som vannet rundt boblene er mer mettet på, for eksempel nitrogen eller oksygen. Denne utskiftingen av gass er imidlertid avhengig av flere parametre, for eksempel mengden metan som er oppløst i vannkolonna. Noen ganger kan også boblene være dekt av en tynn film med olje som kan hindre utveksling av gass mellom boblen og vannet rundt (Jansson et al., 2019).

Metan som er oppløst i vannet kan også nå atmosfæren. Dette forutsetter imidlertid at metanrikt vann blandes opp og inn i det øverste vannsjiktet der gassutveksling med atmosfæren foregår. Vertikal blanding av vann påvirkes av stabiliteten til vannkolonna (lagdeling) og ytre krefter som kan fremprovosere vertikal blanding, for eksempel sterk vind, tidevann eller nedkjølings og fryseprosesser. Her bør det også nevnes at havet generelt sett er undermettet på metan. I tillegg er det, som nevnt over, mikrober i vannet som omdanner metan til karbondioksid. Dette betyr at metanrikt vann må blandes opp relativt raskt hvis det ikke skal utvannes og konsumeres til lave konsentrasjoner. Hvis det er tilstrekkelig lagdeling (som motvirker vertikal blanding) og tilstrekkelig lave ytre krefter som driver vertikal blanding kan dette føre til lave utslipp av metan til atmosfæren til tross for relativt store utslipp på havbunnen selv i grunne farvann (Myhre et al., 2016).

Å måle metan i vannkolonna

Vi kan måle både oppløst metan (metankonsentrasjon) og metan

Bilde som viser metanbobler i vannet sør for Svalbard.
Foto: Stefan Bünz



Metanutslipp (bobler) sett med multistråleekkolodd.
Foto: Manuel Moser

i gassform (bobler). I tillegg kan vi bruke optiske instrument til å observere metanutslipp visuelt.

Vannprøver og bobleprøver kan også gi detaljert informasjon om kilden til metanet vi observerer.

Bobler er gode akustiske reflektorer og gir derfor veldig sterk refleksjon i hydroakustiske instrumenter som for eksempel enkelstråle og multistråle ekkolodd. Disse instrumentene er typisk brukt for å finne fisk eller kartlegge havbunnen og sender ut akustiske signaler i en vifteform. På forskningstokt brukes disse instrumentene til å kartlegge både antall og styrke på utslippspunkt for metan. Enkeltstråle-ekkolodd dekker et lite areal på havbunnen, men kan brukes til å estimere utslippsmengde fra utslippspunkter som blir observert. Multistråle-ekkolodd dekker et større areal og gir mer detaljerte bilder, men vi har foreløpig ikke mulighet til å regne ut eksakte utslippsmengder fra dette instrumentet.

Ved å montere kameraer på undervannsroboter (ROV) kan vi observe utslipp visuelt. Dette kan gi informasjon om hvor mye gass som slippes ut og størrelse og hastighet på gassbobler. Isotopanalyser av vannprøver eller bobleprøver, som kan hentes inn med «boblefangere», kan brukes til å bestemme opphavet til metanet vi måler. Dette gir svar på om metanet er produsert nylig av biologiske prosesser i sedimentene eller om det kommer fra et dypere metanreservoar og ble dannet i en fjern fortid. En ulempe med å bruke ROV er at ROVen selv kan påvirke utslippet ved å forstyrre havbunnen eller boblene.

Den vanligste måten å måle oppløst metan på er å samle vannprøver

fra en forskningsbåt og bestemme metaninnholdet i disse ved å bruke gasskromatografi i laboratoriet. Det finnes også sensorer som kan måle metaninnhold i vannet direkte. Disse brukes også fra båt, i tillegg til på observatorier og fortøyninger med måleinstrumenter. Metansensorer kan måle konsentrasjon av metan nesten kontinuerlig og gir derfor mye høyere oppløsning og større datamengde, sammenliknet med vannprøver. Undervannsmetansensorer er imidlertid relativt ny teknologi med et betydelig innovasjonspotensial, sammenliknet med sensorer som måler saltinnhold og temperatur.

En utfordring med målinger i Arktis er generell mangel på data, og spesielt lengre tidsserier og målinger fra vinterhalvåret. Dette skyldes dårlige værforhold, sjøis og store avstander til infrastruktur. CAGE opererer to moderne «K-Lander», som er autonome havobservatorier. Disse kan plasseres på havbunnen og operere over lang tid (et år) uten tilsyn. Disse observatoriene settes ut fra en utslippsrigg med kamera slik at vi kan se havbunnen der observatoriet settes ut. Ved å montere metansensorer og ekkolodd, samt en rekke andre oseanografiske instrument, har vi fått muligheten til å samle inn data fra flere utslippsområder utenfor Spitsbergen og i Barentshavet gjennom alle årets fire årstider. Dette har gitt oss viktig informasjon om sannsynligheten for utslipp til atmosfæren i vinterhalvåret, hvordan andre oseanografiske parametere påvirker utslipp og fordeling av metan og generelt om variasjon i utslipp og konsentrasjon.

Variasjon i utslipp av metangass og målt metan-konsentrasjon i utslippsområder

Metanutslipp fra kontinentalsokkelen utenfor Svalbards kyst er lavere om vinteren sammenlignet med sommeren. Dette skyldes at stabilitetssonen for metanhydrater flytter seg når temperaturen endrer seg (Ferré et al. 2020). I den kaldeste delen av året er stabilitetssonens øvre grense på rundt 360 meters dyp og bunnvannet rundt 1°C. Når bunnvannet blir varmere igjen, flyttes denne grensen stadig dypere. I den varmeste delen av året er bunnvannet omtrent 5°C og stabilitetssonens øvre grense er rundt 410 meter. I dette beltet (360–410 m dyp) kan derfor gasshydrater dannes om vinteren i de øvre sedimentlagene hvis det finnes en dypere metankilde som tilfører gass til området. Disse metanhydratene vil så gå i oppløsning når temperaturen stiger mot sommeren og frigjøre metanet som ble dannet vinterstid. Dette viser at variasjon av metanutslipp med årstidene er en faktor som må tas hensyn til hvis man ønsker å kvantifisere mengden metan som slippes ut fra havbunnen.

I tillegg til sesongvariasjoner viser en 10 måneder lang tidsserie (Juli 2015

Vannprøveflasker senkes ned i vannet.
Foto: Torger Grytå

– Mai 2016) fra en K-Lander utenfor vestkysten av Spitsbergen at det er enda større variasjoner på kortere tidsintervaller (timer) (Dølven et al. 2022). I denne tidsserien ble sesongvariasjonen målt til ~450 nmol/l (mål på metankonsentrasjonen), mens gjennomsnittlig daglig variasjon ble målt til ~750 nmol/l. Denne variasjonen skyldes imidlertid ikke først og fremst endring i utslipp, men snarere endring i strømretning og styrke: Hvis vannet som måles kommer fra et sted hvor det i relativ nærhet slippes ut mye metan, går metankonsentrasjonen opp, og motsatt hvis vannet kommer fra et område med lite

metan. Strømmen i dette området er sterkt tidevannsdrevet med en daglig rytme. Dette i kombinasjon med stor variasjon i mengde utslipp rundt målepunktet gir derfor en stor daglig variasjon i konsentrasjon. Å basere utslippsestimat fra slike områder på enkeltprøver og interpolering over store områder har, basert på dette funnet, stor usikkerhet.

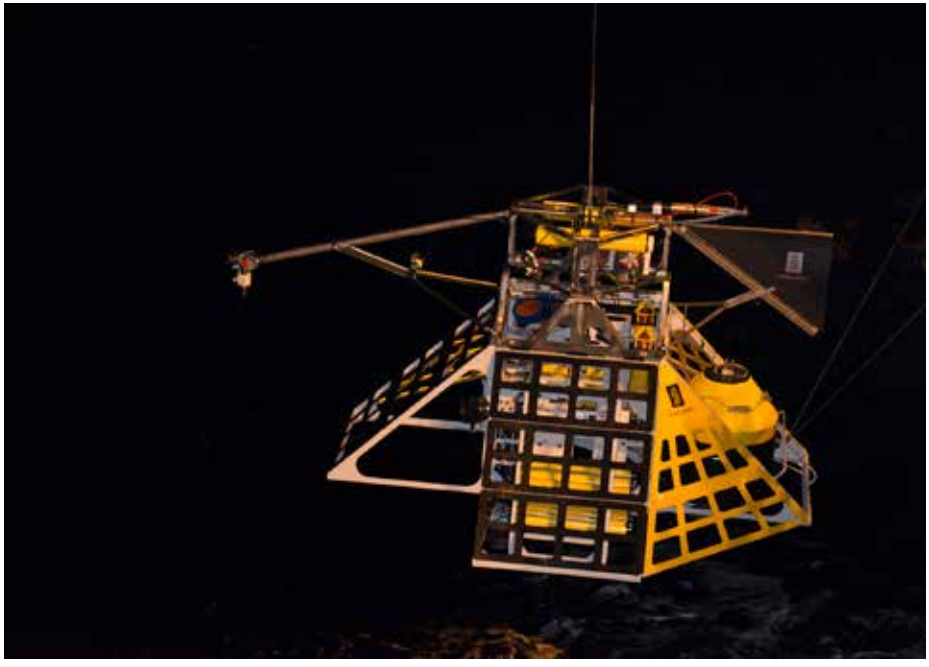
Dataene fra observatoriene viser også at vertikal transport av metan i vannkolonnen kan øke som resultat av minkende lagdeling i vannet og økende påvirkning av vind på høsten og vinteren. En økt vertikal transport kan potensielt bidra til økt utslipp av metangass i atmosfæren i denne delen av året.

Konsekvenser av metanet som aldri når atmosfæren

Utslipp av metan fra havet til atmosfæren fører til økt drivhuseffekt. Mikrobene som omdanner metan til karbondioksid i vannkolonnen gjør derfor en veldig viktig jobb. Ulempen med mikrobenes omdannelse av metan til karbondioksid er at dette fører til havforsuring. Forsuring forbundet med disse mikrobenes omdannelse av metan har blitt observert utenfor østkysten av USA.

Metanutslipp kan også forårsake en endring i oppløst organisk materie (dissolved organic matter – DOM), siden det inngår i havets mikrobielle kretsløp ved å være energikilden til metanotrofiske bakterier (metan-elskende bakterier). Oppløst organisk materie er det største reservoaret av redusert karbon i havet. Dette reservoaret påvirker alle biokjemiske kretsløp og næringskjeder i havet og er sentralt i havets mikrobielle kretsløp.

Påvirkningen av metan på økosystemet er fokuset i det nye EMAN7 prosjektet som nylig er finansiert av Norges Forskningsråd, som skal undersøke biologiske, kjemiske og fysiske tidsserier fra observatorier langs norskekysten.



Et havbunnsobservatorium (en «K-Lander») plasseres ut på havbunnen.
Foto: Bénédicte Ferré

Litteratur:

Dølven, K. O., Ferré, B., Silyakova, A., Jansson, P., Linke, P., and Moser, M. 2022 Autonomous methane seep site monitoring offshore western Svalbard: hourly to seasonal variability and asso ciated oceanographic parameters, *Ocean Sci*., 18, 233–254, https://doi.org/10.5194/os-18-233-2022

Jansson, P., Ferré, B., Silyakova, A., Dølven, K. O., and Omstedt, A. 2019. A new numerical model for understanding free and dissolved gas progression toward the atmosphere in aquatic

methane seepage systems, *Limnol. Oceanogr. Method.*, 17, 223–239, https://doi.org/10.1002/lom3.10307

Ferre, B. et al. 2020. Reduced methane seepage from Arctic sediments during cold bottom-water *conditions. Nat. Geosci.* https://doi.org/10.1038/s41561-019-0515-3

Myhre, C. L., Ferré, B., Platt, S. M., Silyakova et al. 2016. Extensive release of methane from Arctic seabed west of Svalbard during summer 2014 does not influence the atmosphere, Geophys. Res. Lett., 43, 4624–4631, https://doi.org/10.1002/2016GL068999, 2016.

Römer, M., Riedel, M., Scherwath, M., Heesemann, M., and Spence, G. D. 2016., Tidally controlled gas bubble emissions: A comprehensive study using long-term monitoring data from the NEPTUNE cabled observatory offshore Vancouver Island, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 3797– 3814, https://doi:10.1002/2016GC006528.

Wallmann, K. et al. 2018. Gas hydrate dissociation off Svalbard induced by isostatic rebound rather than global warming. *Nat. Commun.* 9, 1–9

Benedicte Ferré er fysisk oseanograf med PhD fra Universitetet i Perpignan, Frankrike, postdoktor fra «United States Geological Survey» i Woods Hole, USA, og har vært forsker ved UiT – Norges Arktiske Universitet siden 2008. Ferré har vært forsker ved CAGE siden oppstart av sentret i 2013, og leder arbeidspakken i sentret som omhandler gass i vannkolonna.
E-post: benedicte.ferre@uit.no

Knut Ola Dølven er postdoktor ved CAGE og tok sin PhD ved sentret i 2022. Han har fokusert på målinger av metan i det marine Arktis, fra juridisk rammeverk til analyser av tidsrekker via teknologisk innovasjon.
E-post: knut.o.dolven@uit.no

Muhammed Fatih Sert er forsker i prosjektet EMAN7 og Ph.d. stipendiat ved CAGE. Han har studert marin biogeokjemi i Polhavet siden 2017.
E-post: muhammed.f.sert@uit.no

Manuel Moser er geofysiker og PhD-kandidat ved CAGE, og jobber med hydroakustiske signaler i gruppen «gass i vannsøylen»
E-post: manuel.moser@uit.no

Da Barentshavet lekket som en sil

Jochen Knies, Aivo Lepland, Shyam Chand og Gudmund Løvø

Frigjøringen av metan i Arktis er sterkt knyttet til oppbygging og tilbaketrekning av iskapper i Barentshavet. I CAGE har vi utviklet metoder for å datere slike hendelser slik at forståelsen av hvordan isen har påvirket metanutslipp fra undergrunnen kan forbedres. Størst utslipp av metan er påvist ved slutten av de to siste istidene i kvartærtiden (Saale og Weichsel). Vi kan også fastslå at utslipp av metan fortsatt pågår, lenge etter at iskappene har trukket seg tilbake.

Ismassene som lå over havområdene og på havbunnen under istidene sørget for at enorme mengder av klimagassen metan ble holdt i sjakk. Islagene er tunge og kalde, og gir økt trykk og temperaturer under havbunnen. Sedimentære bergarter under havbunnen inneholder metan i form av et islignende stoff kalt gasshydrat. I perioder hvor innlandsis trekker seg tilbake, blir isen løftet fra havbunnen, gasshydratene tiner og metan blir frigjort. Ulike studier (Cremiere med flere 2016) har vist at isdekker og metanhydrater er nært forbundet, og at utslipp av metan fra havbunnen har fulgt tilbaketrekningen av Barentshavets isdekke.

Karbonatskorpe på havbunnen ble samlet inn med undervannsfartøyet Ægir 6000.
Foto: NORCRUST

Men er all slik frigjøring av den potente klimagassen nødvendigvis katastrofal? For å besvare spørsmålet er det viktig at man daterer når frigjøringen av metan fra undergrunnen skjedde. Den mest direkte metoden er å datere utfellinger av karbonat dannet nær havbunnen gjennom reaksjon mellom oppstigende metan fra undergrunnen, sulfat løst i vannet og mikrobielle organismer. Karbonatutfellinger kan dateres ved radioaktive dateringsmetoder.

Så langt har våre studier viser at metan faktisk har sluppet ut av havbunnen også etter at Barentshavets isdekke trakk seg tilbake. Noen plasser lekker det fortsatt i dag (Chand med flere 2012). Vi kan fastslå at lekkasjen av metan ikke har skjedd i én stor puls, men over en periode

Ottar 342 – 2022 (4): 30–34

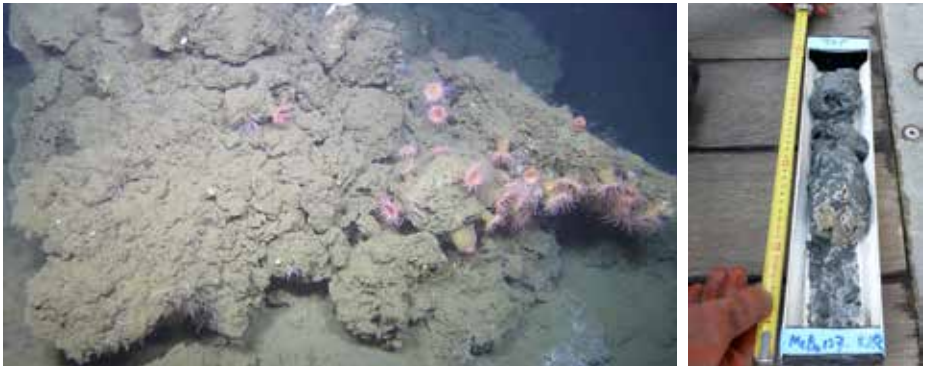
på ca. 10 000 år (17 000 til 7000 år siden) da isen trakk seg tilbake fra Barentshavet på slutten av siste istid. Vi har funnet bevis for at frigjøring av metan også har skjedd mot slutten av nest siste istid, Saale, for rundt 150 000 år siden (Himmler med flere 2019). Det tyder på at globale isdekker kan føre til lagring av store mengder av metan i havbunnen under is, som etter hvert kan slippes fri når isen forsvinner. Vi skal illustrere her hvordan vi har oppnådd resultatene og hvordan vi kan bidra til en bedre forståelse av hva som skjer når metan fra sedimentære bergarter under havbunnen slipper ut i havet og muligens atmosfæren. Videre prøver vi å forstå om det også har skjedd andre metanutslipp mens fortidas klima har vært i forandring.

Radioaktivt materiale forteller tiden

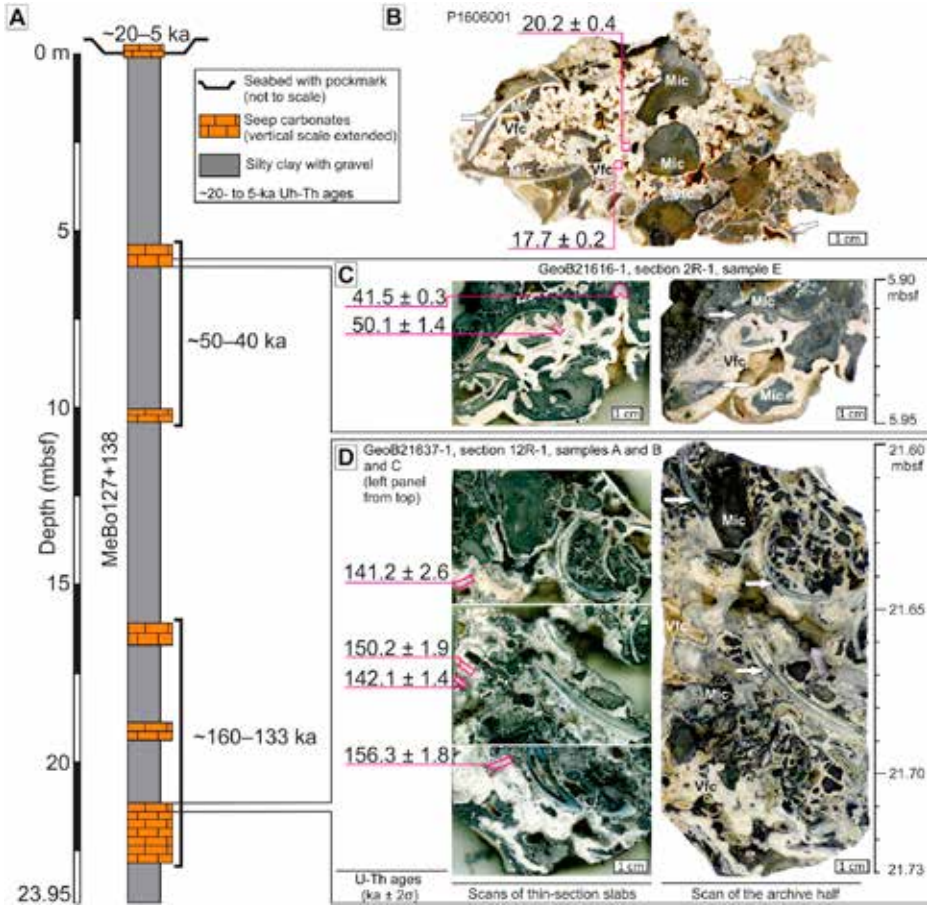
Langvarig utsiving av metan fra havbunnen skaper perfekte forhold for utfelling av karbonatmineraler og sementering av bunnsedimenter. Tjukke karbonatskorper dannes når metan, som beveger seg oppover fra dypere gassreservoarer, blir oksidert av mikroorganismer ved havbunnen.

Skorpene kan dateres ved hjelp av målinger av radioaktive uran- og thoriumisotoper og kan brukes som et geologisk arkiv over gamle metanutslipp. Kort fortalt er uran (U) løselig i sjøvann og kan dermed inngå i krystallgitteret under utfelling av karbonatmineraler, for eksempel

Havbunnsboreriggen MeBo70 på dekk om bord på R/V «Maria S. Merian» utenfor Svalbard.
Foto: Aivo Lepland



På tokt med R/V «G.O. Sars» i juli 2016 samlet undervannsfartøyet Ægir 6000 karbonatskorpe fra havbunnen på 1200 meters vanndyp utenfor Svalbard (t.v.). Til høyre ser vi karbonatskorpe in en borekjerne samlet inn med boreriggen MeBo70.
Foto: CAGE/NORCRUST



Dateringer av karbonatskorpe i borekjernen fra boreriggen MeBo70. (A) Karbonatskorpe i ulike intervall i to borekjerner (MeBo 127 og 138). (B) U/Th-dateringer i karbonatskorpe samlet inn fra toppen av de to borekjernene. (C/D) U/Th-dateringer i karbonatskorpe fra kjerneprøver i ulike intervaller (fra Himmler m.fl. (2019)).

aragonitt. Derimot er thorium (Th) uløselig i sjøvann, og Th tas ikke opp i karbonatkrystaller mens de dannes. Følgelig er den målte 230Th isotopmengden i aragonittkrystallene dannet fra radioaktiv nedbryting av 234U-isotoper. Etter å ha målt konsentrasjoner av 234U- og 230Th-isotoper, kan alderen til karbonatskorpen beregnes ved å studere halveringstidene.

Hvorfor lekker Barentshavet som en sil?

Gass lekker fra havbunnen i Barentshavet. Undersøkelser utført med instrumenter som gransker vannmassene over havbunnen viser opptil 200 meter høye søyler av gassbobler flere steder i Barentshavet (Chand med flere 2012). Gassen er hovedsakelig metan, men også etan og propan siver ut fra bunnen. Gasslekkasjene ser ut til å ligge langs store forkastninger, og det ser ut til at gassøylene kan være knyttet til oppsiving av gass fra dypet, langs lagflater, åpne forkastninger og sprekker. Studier av seismiske data viser at såkalte «bunnsimulerende reflektorer» og gassanomalier opptrer flere steder i Barentshavet.

I tillegg finnes store områder med såkalte «pockmarks», grunne groper i havbunnen som vanligvis tolkes til å være forårsaket av utsivende gass eller væske (Rise med flere 2014). Slike groper finnes bare hvor havbunnen består av finkornede sedimenter – mudder og leire. Det

er ikke funnet aktive gasslekkasjer i disse pockmarkområdene. Studier indikerer at disse gropene hovedsakelig ble dannet og var aktive etter slutten av siste istid (Pau med flere 2014). Modellering viser at stabilitetssonen for gasshydrater i Barentshavet er redusert fra 600 meter for 18 000–20 000 år siden til omtrent null i dag i dette området (Chand med flere 2008). Disse endringene i stabilitetsforholdene kan forklare hvorfor det skjedde en massiv gasslekkasje med dannelse av opptil 150 gassgroper per kvadratkilometer da Barentshavets isdekke trakk seg tilbake.

Når lekket Barentshavet som en sil?

Metanutslipp fra havbunnen er styrt av isdekkene. Lekkasjer fra havbunnen i Barentshavet er knyttet til både framrykking og tilbaketrekking av is. Isens bevegelser aktiverer forkastninger i jordskorpen, og bidrar til metanlekkasjer fra havbunnen på kontinentalsokkelen. I tillegg er gasshydrater, som er lagret på kontinentalsokkelen, utsatt for nedbryting utløst av endringer i isens tykkelse. Vi fant bevis for det utenfor Svalbard på 1200 meters vanndyp. Her hentet vi opp karbonatskorpeprøver ved hjelp av det fjernstyrte undervannsfartøyet Ægir 6000 fra havbunnen. Senere ble boreutstyret MARUM-MeBo70 senket ned på samme sted for å hente opp kjerneprøver med gasshydrater og karbonatskorpe 20 meter under havbunnen.

Datering av karbonatskorper viser tre 10 000 til 20 000 års lange episoder med metanutslipp i dette området gjennom de siste 160 000 årene. Den siste episoden av storskala metanutslipp skjedde da isen dekket både Svalbard og Barentshavet under siste istid. Da isen smeltet, og trykket på jordskorpen avtok for rundt 17 500 år siden, begynte Barentshavet å lekke som en sil (Cremière med flere 2016). Våre data viser at metan først og fremst lekket fra havbunnen da jordskorpens bevegelser forårsaket aktivering av forkastinger utenfor vestlige Svalbard. I tillegg er metanfrigjøringen sammenfallende med rask nedsmelting og tilbaketrekking av isen (iskollaps) ved Eggakanten og tynning av gasshydratets stabilitetssone da isen smeltet bort. Metanutstrømningen fortsatte i minst 7000 til 10 000 år etter første iskollaps (Cremière med flere 2016). Årsaken kan være kortvarige endringer i gasshydratets stabilitetssone i forbindelse med relative havnivåendringer knyttet til isavsmeltingen. Andre årsaker kan være varierende temperaturer i vannmassene ved bunnen da atlantisk vann strømmet inn i Barentshavet igjen etter at isen trakk seg tilbake.

Dateringsdata fra karbonatskorper i borekjerner bekrefter utslipp både fra slutten av siste istid og ved slutten av den forrige istiden, mellom 150 000 og 130 000 år siden.

Karbonatskorper fra borekjerner avslører at det har vært minst to metanutslippsepisoder før siste istid, en for mellom 150 000 til 133 000 år siden og den andre for mellom 50 000 til 40 000 år siden. De nye dataene bekrefter en kobling mellom volumet av isdekker og metanutslipp fra havbunnen i Barentshavet. At utslippene foregikk over en periode på 10 000 til 20 000 år har trolig ført til en dempet virkning av metan på det globale klimasystemet. Foreløpig vet vi ikke hvor mye metan som sivet ut fra undergrunnen da isen smeltet tilbake. Vi kan dermed ikke forutsi om metan fra undergrunnen vil ha en ytterligere effekt på klimaet når den gjenværende isen på kloden har smeltet bort.

Litteratur:

Chand, S., Mienert, J., Andreassen, K., Knies, J., Plassen, L, and Fotland, B., 2008, Gas hydrate stability zone modelling in areas of salt tectonics and pockmarks of the Barents Sea suggests an active hydrocarbon venting system: Marine and Petroleum Geology, 25, 625-636.

Chand, S., Thorsnes, T., Rise, L., Brunstad, H., Stoddart, D., Bøe, R., Lågstad, P., and Svolsbru, T., 2012, Multiple episodes of fluid flow in the SW Barents Sea (Loppa High) evidenced by gas flares, pockmarks and gas hydrate accumulation: Earth and Planetary Science Letters 331, 305-314.

Crémière, A., Lepland, A., Chand, S., Sahy, D., Condon, D. J., Noble, S. R., Martma, T., Thorsnes, T., Sauer, S., and Brunstad, H., 2016, Timescales of methane seepage on the Norwegian margin following collapse of the Scandinavian Ice Sheet: Nature communications, v. 7, no. 1, p. 1-10.

Himmler, T., Sahy, D., Martma, T., Bohrmann, G., Plaza-Faverola, A., Bünz, S., Condon, D. J., Knies, J., and Lepland, A., 2019, A 160,000-year-old history of tectonically controlled methane seepage in the Arctic: Science advances, v. 5, no. 8, p. eaaw1450.

Pau, M., Hammer, Ø., and Chand, S., 2014, Constraints on the dynamics of pockmarks in the SW Barents Sea: evidence from gravity coring and high-resolution, shallow seismic profiles: Marine Geology, v. 355, p. 330-345.

Rise, L., Bellec, V. K., Chand, S., and Bøe, R., 2014, Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords: Norwegian Journal of Geology 94, 263-282.

Jochen Knies er seniorforsker ved Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) i Trondheim, og er også Professor-II ved UiT – Norges Arktiske Universitet. Han har vært arbeidspakkeleder og forsker i CAGE gjennom hele senterperioden. Siden 2017 har han vært assisterende direktør i sentret.
E-post: jochen.knies@ngu.no.

Aivo Lepland er seniorforsker ved NGU i Trondheim, og har vært forsker i CAGE gjennom hele senterperioden.

E-post: aivo.lepland@ngu.no.

Shyam Chand er seniorforsker ved NGU i Trondheim, og har vært forsker i CAGE gjennom hele senterperioden.

E-post: shyam.chand@ngu.no.

Gudmund Løvø er kommunikasjons-rådgiver ved NGU i Trondheim.
E-post: gudmund.lovo@ngu.no

Små, men fulle av gode historier: hva kan kalkskjellene til små havdyr fortelle oss om moderne klimaendringer og metanlekkasjer?

Naima El bani Altuna, Griselda Anglada-Ortiz, Katarzyna Melaniuk, Siri Ofstad, Mohamed M. Ezat, Kamila Sztybor, Christine Lockwood-Ireland og Tine L. Rasmussen

Undersøkelser av både levende og fossile organismer med kalkskjell har avslørt at fortidens klima og metanutsiving alltid har vært ustabile, og at lekkasjen av metan har variert kraftig gjennom tidene. Ved hjelp av disse organismene kan vi forstå hvordan metanlekkasje har påvirket havmiljøet, men også omvendt: hvordan klima- og havtemperaturers forandringer har påvirket metanlekkasje i havbunnen. Vi har studert nåtidens og fortidens utvikling av metanlekkasje i relasjon til klima, CO_2, havtemperaturer og havforsuring.

Vår planet er i rask endring. Utslipp av drivhusgassene karbondioksid (CO_2) og metan (CH_4) er noen av de sterkeste pådriverne av jordas raske oppvarming. Begge gassene frigis av vårt forbruk av blant annet fossile brennstoffer, men de kan også forekomme helt uavhengig av menneskelig aktivitet. Den frosne tundraen og havbunnen i Arktis inneholder store mengder metan frosset inne i is (kalt gasshydrater) eller som fri gass. Økende hav- og lufttemperatur kan øke gassutslipp fra havbunnen til vannsøylen, som igjen vil føre til økt temperatur i atmosfæren og dermed økt global oppvarming. Har disse prosessene skjedd tidligere i jordas historie? Eller er dette noe nytt for vår planet? For å svare på dette spørsmålet vil vitenskapen søke å forstå sammenhengen mellom nåtidens klima og havsirkulasjon. Ved å studere fortidens havsirkulasjonsmønstre, kan vi bedre forutsi fremtidens klimahendelser.

For å forstå utviklingen av de arktiske regionene i fortid, nåtid og fremtid, så jobber vi i CAGE tett sammen med å analysere mikroskopiske til millimeter-store skjell fra organismer som lever og levde i havet. Disse organismene har vanskelige og forskjellige latinske navn, og varierer i størrelse, form, farge og kompleksitet. Likevel, en ting har de til felles: de bygger alle skjell av kalk (kalsium karbonat; $CaCO_3$) ved hjelp av kjemiske elementer i havvannet de lever i. De kalles derfor for marine kalsifiserende organismer. Noen av disse har eksistert i millioner av år og noen er allerede utdødd og finnes bare som fossiler. Det finnes nålevende arter som migrerer sørover i kalde perioder, mens andre arter beveger seg nordover når klimaet blir varmere. Mange lever nær havoverflaten og kalles planktoniske (fra gresk planktos, «det som svever»), mens andre lever ved havbunnen, på selve bunnen eller i havbunnssedimentene. Disse kalles benthiske (fra gresk benthos, «havdypet»). Selv om disse marine kalsifiserende organismene har veldig ulik livsstil, så kan deres foretrukne levevis fortelle oss om nåtidens havforhold så vel som tilstandene i fortidens hav og tidligere dominerende klimaforhold.

Figuren illustrerer hvordan vi forsker. Foto: Kasia Melaniuk, Siri Ofstad, Tine L. Rasmussen.
Grafisk design: Kasia Melaniuk, UiT

I CAGE retter vi søkelyset mot tre vanlige organismer som har kalkskjell: foraminiferer ('poredyr med slimføtter' som er encellede amøbe-lignende organismer med kalkskjell), pteropoder (små havsnegler som svømmer nær havoverflaten, også kalt vingesnegl (engelsk: 'sea butterflies'), og muslinger. Hver av disse gruppene og deres forskjellige arter er tilpasset meget spesifikke miljøbetingelser, som for eksempel temperatur og saltholdighet, men også oksygeninnhold, pH i vannet og hvilken type mat som er til stede. Tilstedeværelsen av en gitt art kan da, for eksempel, fortelle oss om det var kaldt eller varmt, om det var høy eller lav produktivitet, og om forholdene var oksygenrike eller ikke.

Når organismene dør og blir begravd i havbunnen, kan deres kalkskjell bli bevart som et fossil. På det viset blir de til et arkiv for fortidens forhold og kan fortelle oss om klima og betingelsene i havet på den tid de levde. Dette kan bidra til å øke vår forståelse av utviklingen i fortiden og dermed gjøre oss bedre til å forutse hvordan utviklingen kan bli i fremtiden, når både hav og klima er blitt mye varmere enn i dag.

Livet i undersjøiske metan utsivingsmiljø

Ved første øyekast kan områder med metanutslipp på havbunnen i Arktis virke kalde, mørke og giftige, der ingen levende organismer kan trives, eller overleve. Kraftige metankilder er giftige for de fleste organismer pga. mangel på oksygen og høyt sulfidinnhold (umiskjennelig ved stanken av råtne egg), samt høyt innhold av CO_2 (når CH_4 kommer ut i vannet så oksideres det til CO_2). Dette er i stor kontrast til områder der metanutsivingen er mer moderat: Der kan det være en veldig rik fauna av såkalte rørormer, snegler og muslinger, kråkeboller, slangestjerner og benthiske foraminiferer. Det rike bunnlivet tiltrekker seg også mange fiskearter og skaper et yrende dyreliv.

Når metan siver ut fra havbunnen utvikles helt unike økosystem som er basert på bakterier (og arkebakterier) som lever av metan og sulfat, i motsetning til organismer som bruker solenergi i havoverflaten, i vannsøylen, eller på land. Vi kaller disse områdene for 'kalde ventilsystemer' (engelsk 'cold seeps'), i kontrast til de vulkanbaserte hydrotermiske utsivingsområdene langs midthavsrygger. Bakteriene er en matkilde for andre organismer, som foraminiferer, men kan også eksistere i symbiose med kjemosyntetiserende muslinger og rørormer. De to sistnevnte organismene har ikke fordøyelsessystem, men får hjelp til dette av bakteriene. Utsiving av metan fra havbunnen i kombinasjon med biologiske og miljømessige prosesser gir betingelser som marine organismer med kalkskjell kan trives i, selv om omgivelsene faktisk er sterkt ugjestmilde.

Når marine kalsifiserende organismer bygger sine kalkskjell, tar de opp karbon fra vannet de lever i, samt fra maten de inntar. Disse karbonkildene består av lette ^{12}C-isotoper og tunge ^{13}C-isotoper. Forholdet mellom disse isotopene, som har forskjellig atomvekt, kalles karbonisotopsignaturen (skrives som $\delta^{13}C$). Dette forholdet tas opp i skjellene av de marine organismene. Ved tilgang til rikelig mat på havbunnen, vil det være mer av ^{12}C tilgjengelig, men hvis det er knapphet på mat, så vil de inkorporere mindre ^{12}C. Fordi metan også har ekstremt lite ^{13}C vil organismer som lever i metanpåvirkede områder ha veldige lave $\delta^{13}C$ signaturer. Derfor kan karbonisotopsignaturen i disse skjellene fortelle oss om graden av metanutsiving fra havbunnen: jo lavere $\delta^{13}C$ signaturverdier, jo mer metan ha sivet ut.

Kalkskjell fra små dyr i havet forteller om fortidens klimaendringer og høye metanutslipp

Som nevnt ovenfor, blir metan som siver ut fra havbunnen raskt oksidert til karbondioksid (CO_2). Den økte mengden CO_2 i havet endrer havvannets kjemi ved at det øker surheten og dermed gir lavere pH verdi. Likevel er ikke metanutslipp fra havbunnen den største årsaken til økt CO_2 i havet: CO_2-utslipp i atmosfæren fra forbruk av fossile brennstoffer blir nemlig også oppløst i havvannet. Økningen av CO_2 i havet og den medfølgende havforsuringen kalles for den globale oppvarmingens «medsammensvorne».

Kalk løses opp ved lav pH, og når mengden CO_2 i havet øker, kan det skje en drastisk reduksjon i artsdiversitet og mengden av organismer med kalkskjell. Kalk finnes i ulike former, der formen kjent som aragonitt oppløses raskere ved lav pH enn formen kjent som kalsitt. Pteropoder med kalkskjell av aragonitt er derfor foreslått å representere 'kanarifuglen i kullgruva', siden de

Figuren illustrerer hva vi forsker på.
Foto: Griselda Anglada-Ortiz, Kasia Melaniuk, Tine L. Rasmussen.
Grafisk design: Naima El bani Altuna, UiT

er de mest følsomme organismene for havforsuring. Oppløsning og misdannelser av kalkskjellene til disse pteropodene vitner om problemer med havforsuring. Likevel vet vi lite om hvordan andre marine kalsifiserende organismer vil reagere på økt havforsuring. Tidligere eksperimenter har vist at noen organismer påvirkes

Figuren illustrerer hvordan kalsifiserende organismer kan bygge skall i metanlekkasjesteder.
Grafisk design: Kasia Melaniuk, UiT

i stor grad og dermed konstruerer tynnere og mindre skjell, mens andre ser ut til å trives bra og bygger kraftigere skjell – som kan medføre at de blir fremtidens dominerende arter i havet. For å komplisere saken ytterligere har våre studier av levende planktoniske foraminiferer og pteropoder vist at de kan ha sterkt varierende skjelltykkelse som primært ser ut til å være styrt av deres alder og grad av modenhet.

I vår forskningsgruppe studerer vi planktoniske foraminiferer og pteropoder som lever nær havoverflaten i områder med utsiving av metan og i områder uten metanpåvirkning. Her undersøker vi hvilke arter som finnes, samt deres antall på ulike steder og ved ulike sesonger. Videre ser vi dette i sammenheng med miljøforholdene i vannmassene (temperatur, saltholdighet, pH, og mengden og kvaliteten på maten de inntar). I aktive metanområder fant vi ingen direkte indikasjoner på at forsuringen har noen negative eller positive effekter på deres skjell, og vi så heller ingen effekt på $\delta^{13}C$ signaturen. Derimot tyder resultatene på at metan forårsaker økt produktivitet, ettersom vi ser en økning i antallet av pteropoder og planktiske foraminiferer som lever over metanområder fremfor utenfor – altså at det er mer mat tilgjengelig for disse organismene i metanpåvirkede områder.

I det arktiske havet og i det nordlige Barentshavet har vi observert en økning i arter av foraminiferer som normalt hører til i varmere områder, som for eksempel Atlanterhavet. Arktiske områder varmes opp, ikke bare på grunn av økt temperatur i atmosfæren, men også på grunn av økt tilførselen av varmt Atlantisk vann til polområdene. Vitenskapen kaller dette fenomenet for 'Atlantifisering', noe som betyr at arktiske områder begynner å ligne mer og mer på den Atlantiske regionen. Med mer og varmere Atlantisk vann migrerer stadig flere sydlige arter nordover; derfor ser vi at varmtvannsarter av planktoniske foraminiferer blir hyppigere i Arktis i dag i forhold til hvordan det har vært tidligere.

Enten det er på grunn av havforsuring eller 'Atlantifisering', så er det et faktum at miljøet i havet endrer seg sammen med klimaet. De marine kalsifiserende organismene er noen av de beste instrumentene til å

studere og forstå havets respons på de globale forandringene i Arktis.

Hva kan de med kalkskjell fortelle oss om fortidens klima og havmiljø?

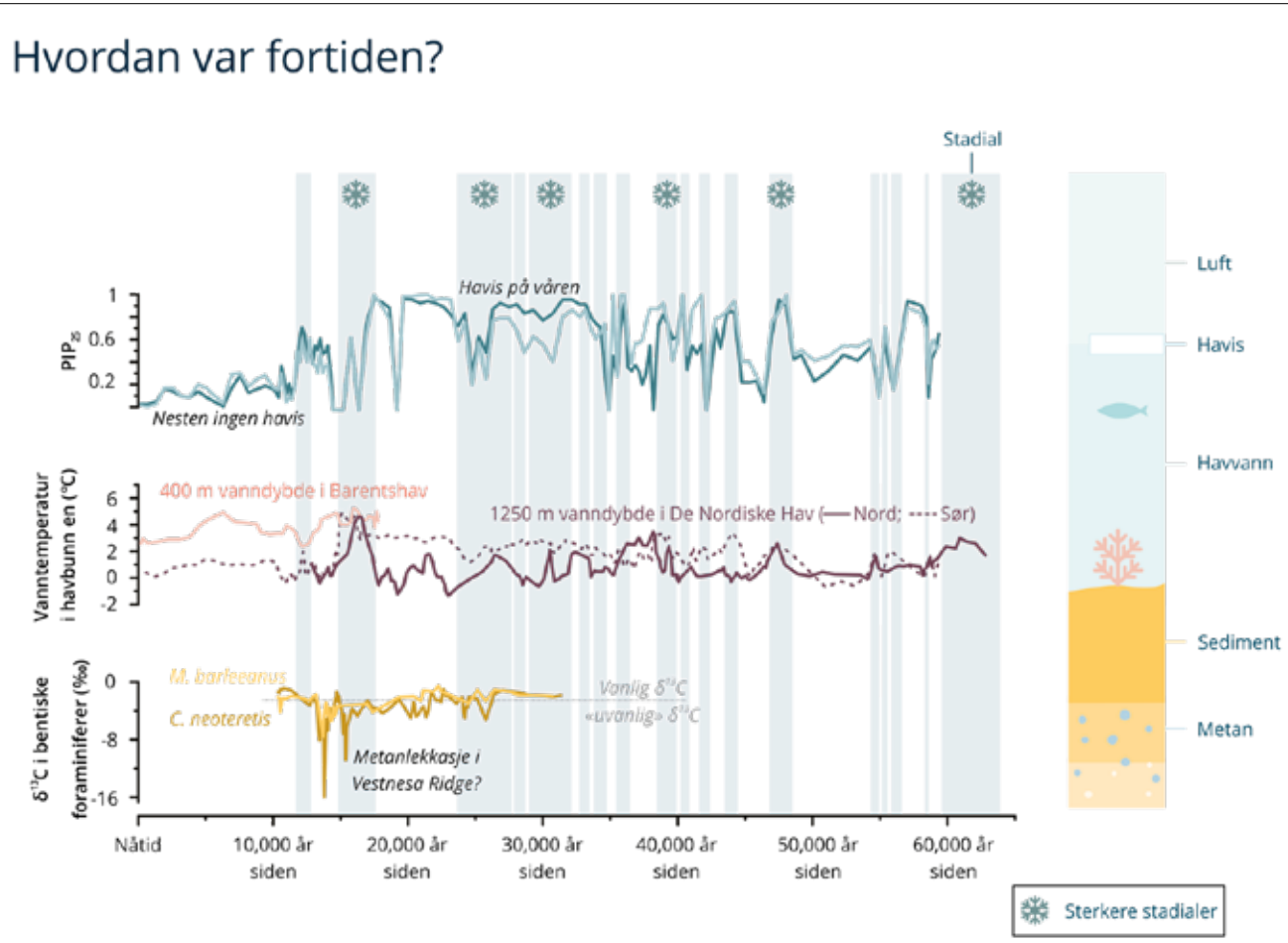
Selv før vi mennesker begynte å påvirke klodens klima og miljø, var fortidens klima langt fra stabilt. 125.000 år før vår tid, under mellomistiden kalt Eem, var det mye varmere (4–6°C), og havnivået var 6–8 meter høyere enn det er i dag. Planter som nå for det meste finnes langt mot syd, f.eks. hasselnøtt, misteltein og kristtorn, var vanlige i Norden (interessant nok er det disse vi pynter med til jul). Eem-tiden tok brått slutt, og den siste istiden, kalt Weichsel-istiden, begynte for 115.000 år siden. Kilometer-tykke iskapper bredte seg over Nord-Amerika og Skandinavia og atmosfærens innhold av CO_2 og metan var veldig lav. Istiden sluttet for 11.500 år siden, og de to drivhusgassene økte til nivået vi kjenner fra før den industrielle tid begynte for 200 år siden. Fra 11.500 år og fremover i tid ble jordens klima varmere og mer stabilt enn under istiden – denne mellomistiden kalles Holocen, og er den vi lever i nå. Takket være CO_2-målinger av luftbobler i isen i Antarktiske iskjerner, så vet vi at innenfor de siste 800.000 år så har CO_2 konsentrasjonen i atmosfæren aldri vært så høy som den er nå. Faktisk må vi mer enn 5 millioner år tilbake i tid for å finne et nivå som tilsvarer dagens nivå.

Vi vet også at det under istiden oppstod raske oppvarminger med 500–3000 års mellomrom, og med en hastighet som tilsvarer den raske oppvarmingen vi ser i dag. Dette vet vi ut ifra Grønlandske iskjerner som viser et underlig sikksakk-formet temperaturmønster for perioden 115.000–11.500 år siden: temperaturen kunne øke plutselig med opp til 16.5 °C på få tiår. Etter en kort periode med høyere temperaturer falt temperaturen gradvis og stabiliserte seg for en lengre og kaldere periode, inntil mønsteret gjentok seg. De korte, varme periodene kaldes interstadialer, mens de kalde periodene kalles stadialer. Årsakene til disse kortvarige, plutselige klimasvingningene er ikke helt forstått enda, men forskere er enige i at de trolig skyldes en kombinasjon av samspillet mellom atmosfæren, havet, og smeltevann fra iskappene på kontinentene.

Men hvordan kan vi rekonstruere hav- og atmosfæreklima tusenvis av år tilbake i tid, når termometre og målinger kun har eksistert i knappe 150 år? For å dokumentere hav- og klimautviklingen, undersøker vi forskjellige lag av gjørme, sand og grus på havbunnen og fossilene som finnes bevart i disse lagene. Hvis vi kan datere disse lagene, kan vi ekstrahere informasjon om havsirkulasjonen og klimaet i fortiden med stor nøyaktighet. Havbunnene utgjør derfor noen av de beste 'arkivene' vi har over fortidens utvikling, siden disse gjørmelagene kan inneholde millioner av år med informasjon.

Havbunnen i de nordiske havene vest for Svalbard og i Barentshavet inneholder tusenvis av fossiler av marine skjell som kan fortelle oss om klimaet og oseanografien i fortiden. De rike forekomstene av gasshydrater i disse områdene, altså metan frosset inn i is, gir også mulighet til å studere variasjonen i utsivingen av gass gjennom tiden. Et av de viktigste spørsmålene er: varierer mengden av gassutslipp med variasjoner i klima og havtemperatur? Vi gir her eksempler på slike resultater fra Vestnesaryggen nordvest for Svalbard og fra Storfjordrenna sør for Svalbard.

Under de varme interstadialene i istiden var havsirkulasjonen nesten som i dag, med varmt og salt Atlantisk vann fra Golfstrømmen på overflaten og med kaldt dypvann under dette. I løpet av de kalde stadialene derimot, da Skandinavia og Arktis var dekket av tykke iskapper og havet ikke hadde forbindelse til atmosfæren på grunn av tykt havisdekke, så var strømmønstrene veldig forskjellig fra i dag. Det var kaldt på overflaten mens dypvannet var varmt. Vi vet dette takket være de benthiske foraminifer-'termometrene' vi benytter: skjellene deres består av $CaCO_3$, men jo varmere vannet er, jo mer magnesium (Mg) bygger de inn i skjellene. Ved å måle mengden av Mg i de benthiske foraminiferene, så fant vi ut at under stadialer steg temperaturen ved havbunnen i de nordiske havene



Figuren illustrerer hvordan miljøet har endret seg gjennom de siste 60,000 år. Fra Ezat med flere 2014, Hoff med flere 2016, Sztybor og Rasmussen 2017, El bani Altuna med flere 2021.

Grafisk design: Naima El bani Altuna

helt opp til 5.5°C der temperaturen i dag er -1°C. Vi ser også at den benthiske foraminiferfaunaen består av arter som trives i varmt vann og som i dag bare finnes i Middelhavet og midt-Atlanteren, og som migrerte helt til Svalbard marginen under stadiale miljøbetingelser.

Med disse resultatene spør vi: Kan en slik oppvarming av havbunnen ha hatt effekt på stabiliteten av gasshydrater på Svalbardmarginen? Stabiliteten av gasshydrater avhenger av trykk og temperatur. Ettersom de smelter ved økt temperatur, så ville vi forventet økt utsiving av metan under stadialene. Å bestemme intensiteten

av fortidens gassutsiving kompliseres av at utsivingen forårsaker kjemiske prosesser som kan 'overskrive' den opprinnelige $\delta^{13}C$-signaturen til foraminiferene. Likevel, siden vi kjenner disse prosessene, kan vi faktisk bruke dem i vår favør. Som nevnt så kan karbonisotopene i benthiske foraminiferer brukes til å oppdage metan fra deres omgivelser, ved at det gir ekstremt lave $\delta^{13}C$ signaturer i foraminiferskjell. Ut fra dette kan vi se at metanutsivingen på Vestnesaryggen og i Barentshavet ble intensivert for sirka 16.000 år siden og ble veldig kraftig for 15.000 til 13.000 år siden, kort tid efter den siste stadiale bunnoppvarmningen. På Vestnesaryggen ble en ny muslingart, *Acharax svalbardensis*, oppdaget fra den siste stadial. Denne varmekrevende muslingen lever ikke i Arktis i dag, men fantes sammen med andre varmekrevende muslingarter. Disse artene er alle avhengige av metanutsiving for å få næring. De fins bare som fossiler rundt Svalbardmarginen, men deres tilstedeværelse for 17.000–16.000 år siden viser at metanutsivingen var aktiv, også i fortiden.

CAGE slutter om mindre enn et år, men vår gruppe vil fortsette med studiene av levende og fossile organismer for bedre å kunne forstå nåværende klima- og miljøendringer og forbedre rekonstruksjonen av fortidens hendelser. Et nytt prosjekt titulert «The Arctic Ocean under Warm Climates (ARCLIM)» ledet av Mohamed Ezat vil utvide studiene av levende planktoniske foraminiferer. Dette innebærer laboratorie-eksperimenter på pH og temperatur for å undersøke deres respons på havforsuring og oppvarming, samt utvikle nye geokjemiske metoder for studiet av nåtid og fortid. ARCLIM vil sette søkelys på fortidens perioder som var varmere enn i dag, og bruke denne kunnskapen til å forbedre våre modeller for fremtidens mulige klima og miljø.

Litteratur:

Anglada-Ortiz, G., Zamelczyk, K., Meilland, J., Ziveri, P., Chierici, M., Fransson, A., Rasmussen, T.L., 2021. Planktic Foraminiferal and Pteropod Contributions to Carbon Dynamics in the Arctic Ocean (North Svalbard Margin). Front. Mar. Sci. 8, 661158. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.661158

El bani Altuna, N., Rasmussen, T.L., Ezat, M.M., Vadakkepuliyambatta, S., Groeneveld, J., Greaves, M., 2021. Deglacial bottom water warming intensified Arctic methane seepage in the NW Barents Sea. Commun Earth. Environ. 2, 188. https://doi.org/10.1038/s43247-021-00264-x

Ezat, M.M., Rasmussen, T.L., Groeneveld, J., 2014. Persistent intermediate water warming during cold stadials in the southeastern Nordic seas during the past 65 k.y. Geology 42, 663–666. https://doi.org/10.1130/G35579.1

Hoff, U., Rasmussen, T.L., Stein, R., Ezat, M.M., Fahl, K., 2016. Sea ice and millennial-scale climate variability in the Nordic seas 90 kyr ago to present. Nat. Commun. 7, 12247. https://doi.org/10.1038/ncomms12247

Melaniuk, K., Sztybor, K., Treude, T., Sommer, S., Rasmussen, T.L., 2022. Influence of methane seepage on isotopic signatures in living deep-sea benthic foramini fera, 79° N. Sci Rep 12, 1169. https://doi.org/10.1038/s41598-022-05175-1

Sztybor, K., Rasmussen, T.L., 2017. Late glacial and deglacial palaeoceanographic changes at Vestnesa Ridge, Fram Strait: Methane seep versus non-seep environments. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 476, 77–89. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.04.001

Naima El bani Altuna har sin PhD fra CAGE, hun er nå postdoktor og forsker i TFS-prosjektet ARCLIM ved CAGE, UiT – Norges Arktiske Universitet. Hun studerer fortidsklima og havsirkulasjon i Arktis.
E-post: naima.elbani.altuna@uit.no

Griselda Anglada-Ortiz er PhD-stipendiat i havforsuring og karbon-syklus ved UiT – Norges Arktiske Universitet under Arven etter Nansen-prosjektet siden mai 2019.
E-post: griselda.a.ortiz@uit.no

Katarzyna (Kasia) Melaniuk har en doktorgrad i marinbiologi fra CAGE, og er lektor i mikropaleontologi ved UiT – Norges Arktiske Universitet, og er spesialist på foraminiferers relasjon til metan.
E-post: Katarzyna.melaniuk@uit.no

Siri Ofstad er en miljørådgiver innenfor marinbiologi og marin forurensing hos COWI AS. Hun har en doktorgrad i marinbiologi og geologi fra CAGE, UiT – Norges Arktiske Universitet.
E-post: siof@cowi.com

Mohamed Ezat har tatt sin PhD ved CAGE, vært post-doktor ved sentret, og leder nå TFS-prosjektet ARCLIM og er klimaforsker ved CAGE, UiT – Norges Arktiske Universitet.
E-post: mohamed.ezat@uit.no

Kamila Sztybor forsvarte sin doktorgradsavhand-ling tilknyttet CAGE i 2017. Hun jobber nå som rådgiver i seksjon for biologi og taksonomi hos Akvaplan-niva, Tromsø.
E-post: ksz@akvaplan.niva.no

Christine Lockwood-Ireland er PhD-stipendiat i klima- og hav-sirkulasjon ved CAGE, institutt for geovitenskap, UiT – Norges Arktiske Universitet. E-post: Christine.Lockwood.Ireland@uit.no

Tine L. Rasmussen er professor i marin geologi og paleoseanografi ved institutt for geovitenskaper ved UiT – Norges Arktiske Universitet. Hun leder en arbeidsgruppe i CAGE på temaet «Metan, Havforsuring og CO_2».
E-post: tine.rasmussen@uit.no

Formidling av forskning i CAGE

Mariana Esteves og Karin Andreassen

CAGE startet med blanke ark i 2013. I dag er sentret verdensledende på gasshydratforskning relatert til klima og miljø. Forskningsformidling har spilt en sentral rolle i vår strategi for å nå dit vi er i dag.

Selv om flere av forskerne i CAGE var godt etablerte da sentret startet i 2013, måtte CAGE opparbeide sin egen identitet og eget omdømme. Vår strategi har siden oppstart vært å dele våre forskningsresultater med allmennheten, industri, media og alle andre interesserte. CAGE har hatt over 1300 medieoppslag, inkludert i aviser som Washington Post, New Scientist, Siberian Times, Herald, and Sydney Morning. Vi har i tillegg til tradisjonelle media, som aviser, radio og TV, også hatt oppslag i sosiale media, som YouTube, Twitter (@CAGE_COE), Facebook og Instagram (@cage.coe).

Vitenskapelig kunnskap i en verden av falske nyheter

Aldri har det vel vært viktigere enn nå for forskere å formidle vitenskapelige resultater og metoder til allmennheten på en måte folk generelt kan forstå og gjerne også relatere seg til. Særlig gjelder dette innafor fagfelt som direkte utforsker endringer i klima og miljø, og særlig i Arktis, der oppvarmingen nærmer seg tre ganger høyere enn ellers på jorda. Et viktig spørsmål er hvilken betydning metanlekkasjer har for klima og miljø i et Arktis som blir stadig varmere. Vi fikk, ved tildeling av forskningssentret CAGE, i oppgave å utforske dette temaet, og vi har hatt ekspertise, ressurser og infrastruktur til å kunne være en viktig bidragsyter til ny kunnskap på dette området.

CAGE har prioritert forskningskommunikasjon høyt, og vi ansatte kort etter senteretableringen vår egen kommunikasjonskoordinator, Maja Sojtaric, som siden 2014 har utformet vår kommunikasjonsstrategi, oppdatert vår hjemmeside, «oversatt» våre vitenskapelige resultater til populærvitenskapelige historier, skrevet pressemeldinger, tilrettelagt for møter med nasjonal og internasjonal presse, og styrt vår aktivitet på sosiale media. Vi har erfart at det er viktig å

Åpningssiden i en YouTube animasjon, https://youtu.be/oNg0z-bYsmY, utarbeidet av Maja Sojtaric og publisert på YouTube som appetittvekker for en vitenskapelig publikasjon i tidsskriftet «Science» (Andreassen med flere 2017) som omhandler km-store kratre på havbunnen i Arktis, dannet av metanutblåsninger ved slutten av siste istid, for omtrent 12.000 år siden.

Medieoppslag fra CAGE fins i UiTs database Septentrio https://septentrio.uit.no/index.php/cage under Archives, Science Communication.
Foto/Illustrasjon: Torger Grytå

ha en historieforteller som kjenner tematikken og forskningsfronten for de involverte fagfeltene. I mai 2021 forlot Maja oss for nye journalistiske samfunnsoppgaver, og vi var så heldige å få Mariana Esteves som ny kommunikasjonskoordinator i CAGE.

Forberedelser til en ny mediaverden

Ved oppstarten av sentret hadde forskere i CAGE, som forskere flest, liten erfaring med presseformidling. Sentrets beskjedne formidlingsmål var, i vår søknad til Norges Forskningsråd i 2011, å få minst fire internasjonale presseoppslag hvert år. Etter første år med egen kommunikasjonskoordinator hadde CAGE 64 medieoppslag, etter dette har vi hatt i gjennomsnitt 188 medieoppslag i året.

Kommunikasjon med pressen er klart utafor komfortsonen for de fleste forskere. I CAGE har forskerne blitt kontinuerlig oppfordret til å satse høyt, og presentere sine forskningsresultater i de mest prestisjefylte vitenskapelige tidsskrifter. Sammen med sentrets kommunikasjonskoordinator har forskerne utarbeidet pressemeldinger eller pressepakker med visuelt innhold som har blitt sendt ut samtidig med selve publikasjonen. Vår strategi har vært å oversette resultatene til populærvitenskapelige historier som formidles bredt. Særlig internasjonale media har vært sultne på ny kunnskap om endringer av klima og miljø i Arktis, og vi har erfart at interessen har økt når vi, i tillegg til en enkel pressemelding, også har delt link til visuelt innhold som umiddelbart fenger og pirrer seernes nysgjerrighet, som YouTube animasjoner.

CAGE har sammen med forskerskolen ved Institutt for Geofag arrangert kurs og arbeidsseminarer med fokus på mediekommunikasjon, forskningsformidling, datavisualisering og blogging.

Våre forskere har vært invitert til og deltatt i internasjonale pressekonferanser relatert til klimaendringer,

Tegneseriebilde fra prosjektet ICEMAP, som er en interaktiv installasjon ved Nordnorsk Vitensenter i Tromsø, og også en internettside (https://icemap.no/en/), der en både kan se Lennys historier og interaktivt utforske utviklingen av is og miljø gjennom siste istid. Illustrasjonen viser deler av Lenny lemen ferd gjennom istiden.
Illustrasjon: Alice Kvalvik

som på FNs COP26 (26. internasjonale Konferanse for Klimaendringer, som i 2021 samlet verdens ledere innen politikk, industri og næringsliv i Glasgow for å enes om aksjoner som kan bringe verden nærmere målene for Parisavtalen), på EGUs (Euopean Geoscience Union) og på AGUs (American Geophysical Union) årlige konferanser. De har deltatt på vitenskapsmesser og gitt populærvitenskapelige foredrag, arrangert utstillinger på UiTs Forskningsdager, gitt radiointervjuer og laget animasjons-videoer sammen med TED-Ed, som eksempel https://youtu.be/jhRuUoTnA6g
Forskjellige medieoppslag fra CAGE fins i Septentrio, https://septentrio.uit.no/index.php/cage under Archives, Science Communication, mens en rekke CAGE YouTube

CAGE forsker Pavel Serov på Verdensteatret i Tromsø under naturvitenskapelig filmkveld.
Foto: Malin Waage

videoer fins på lenken https://www.youtube.com/channel/UCLwPinRcG-KN4nxGnxveT6zA/videos.

Fra lokale utstillinger til den røde løper i Cannes og Hollywood

CAGE har i samarbeid med lokale museer produsert utstillinger som formidler vår forskning til allmennheten og barn. Vi har også samarbeidet med en rekke forskjellige aktører om å lage en interaktiv, kart-basert installasjon til ei utstilling ved Nordnorsk Vitensenter i Tromsø. Installasjonen, ICEMAP, illustrer utviklingen av den store iskappen som dekket Nord-Europa under siste istid, for rundt 24.000 år siden. Visualiseringen av isutviklingen er basert på publiserte, matematiske modeller utført av CAGE forskere. Fra 2018 har en ved Vitensentret kunnet utforske hvordan de store iskappene vokste fra flere små iskapper, hvordan iskappene ble brutt opp og forsvant da det ble varmere ved slutten av istiden, og hvordan havnivået og miljøet endret seg. Den kart-baserte is-animasjonen er forbundet med en tegneserie, der Lenny lemen forteller historien om noen av de store miljø-endringene som skjedde i løpet av istiden. Lemen er en endemisk art som overlevde istiden i nord, trolig på nunataker som stakk opp av isen, eller i isfrie områder utafor isranden.

Lenny forteller spennende, illustrerte historier fra istiden. Du kan møte han på Nordnorsk Vitensenter i Tromsø, eller du kan sjekke Internettsiden ICEMAP (https://icemap.no/en/), der du både kan se Lennys historier og interaktivt utforske utviklingen av is og miljø gjennom siste istid. Disse digitale visualiseringene, som vi ivrig har delt på sosiale media, har fått mye oppmerksomhetbåde i vitenskapelige og ikke-vitenskapelige miljø. Blant annet inngår nå materialet fra ICEMAP-prosjektet som en del av en permanent utstilling om utdødde dyr og miljøendringer ved «National Museum of Northern Ireland» i Belfast.

I 2019 førte kommunikasjons-aktiviteten CAGE til røde løpere både på filmfestivalen i Cannes og i Hollywood i forbindelse med premierer for dokumentaren Ice on Fire, som er produsert og fortalt av Oscarvinner Leonardo DiCaprio. Flere forskere fra CAGE deltar i filmen, som omhandler forskning på klimaendringer, drivhusgasser og teknologiutvikling for reversering av global oppvarming. Dokumentaren er vist flere ganger i Tromsø, først på Verdensteatret i et samarbeid mellom CAGE og ARC – Arctic Centre for Sustainable Energy, deretter på Tromsø Filmfestival, og så på en naturvitenskapelig filmkveld på Verdensteatret, arrangert av Fakultet for Naturvitenskap og Teknologi ved UiT.

Mariana Esteves er prosjektleder for CAGE – Norges Arktiske Universitet, der hun koordinerer administrasjon og kommunikasjon ved sentret. Hun har sin PhD i maringeologi fra CAGE/UiT og vært ansatt som forsker ved sentret.
E-post: mariana.esteves@uit.no

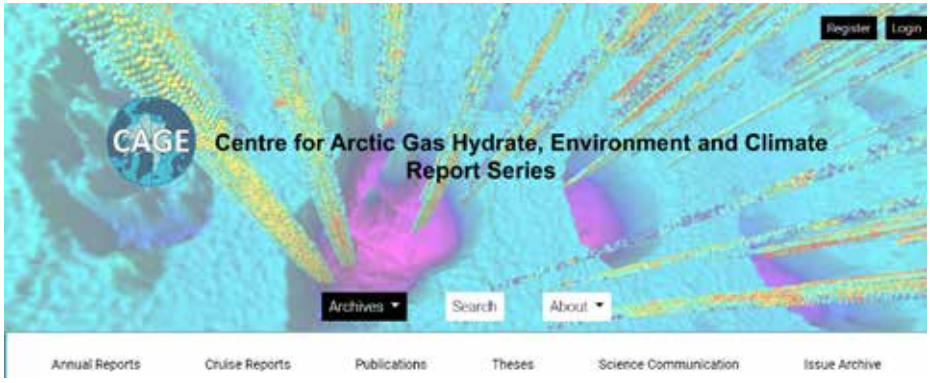
Karin Andreassen er professor i marin geologi og geofysikk ved UiT – Norges Arktiske Universitet. Hun har vært direktør for CAGE siden 2017, og var i perioden 2013–2016 assisterende direktør i sentret.
E-post: karin.andreassen@uit.no.

CAGE, database, fra intern ressurs til offentlig arv

Fabio Sarti og Karin Andreassen

CAGE har gjennom snart 10 år som senter for fremragende forskning bygd opp et stort arkiv med publikasjoner, rapporter og data fra Arktis. Vår database er en portal til slik informasjon. En brukervennlig plattform med et interaktivt kart gir oversikt over data vi har samlet inn, publikasjoner, informasjon om forskjellige CAGE-rapporter og lenker til disse.

CAGE – «Senter for Arktisk Gasshydrat, Miljø og Klima» utforsker naturlige lekkasjer av drivhusgassen metan fra havbunnen i Arktis. Våre studier er basert på utstrakt innsamling av forskjellige geofysiske, geologiske og biologiske data fra det marine Arktis. CAGE har gjennom sine snart 10 år som senter for Fremragende Forskning gjennomført over 50 forskningstokt til Barentshavet og Polhavet. Våre forskere har tilbakelagt over 150 000 km med Forskningsfartøyene *Helmer Hanssen* (eid av UiT – Norges Arktiske Universitet), *Kronprins Haakon* (eid av Norsk Polarinstitutt) og *G.O. Sars* (eid av Universitetet i Bergen) og samlet inn data fra over 3000 stasjoner, hovedsakelig prøver fra lagene under havbunnen, fra havbunnen, vannsøyla og atmosfæren. Vi har publisert over 430 vitenskapelige artikler i anerkjente internasjonale tidsskrift basert på disse dataene, og skrevet en lang rekke blogger fra våre forskningstokt. I tillegg er årlig oversikt over våre aktiviteter og resultater dokumentert i sentrets populærfaglige årsrapporter, datainnsamlingene er dokumentert i våre toktrapporter, de digitale rådataene er lagret i vår database, mens de fysiske prøvene er lagret i vårt kjernelager. CAGE hjemmeside, https://cage.uit.no har gjennom senterperioden (2013–2023) gitt en god oversikt over vår aktivitet, resultater og data, men siden CAGE er historie fra 01. mars 2023, har vi jobbet med å sikre at data og resultater av vår forskning blir samlet i et åpent tilgjengelig arkiv for fremtidig bruk. Til dette har vi valgt å bruke Septentrio, den åpne publiseringskanalen til UiTs Universitetsbibliotek som kanal for våre resultater.



Åpningssiden for CAGE dataarkiv i Septentrio, https://septentrio.uit.no/index.php/cage

Septentrio

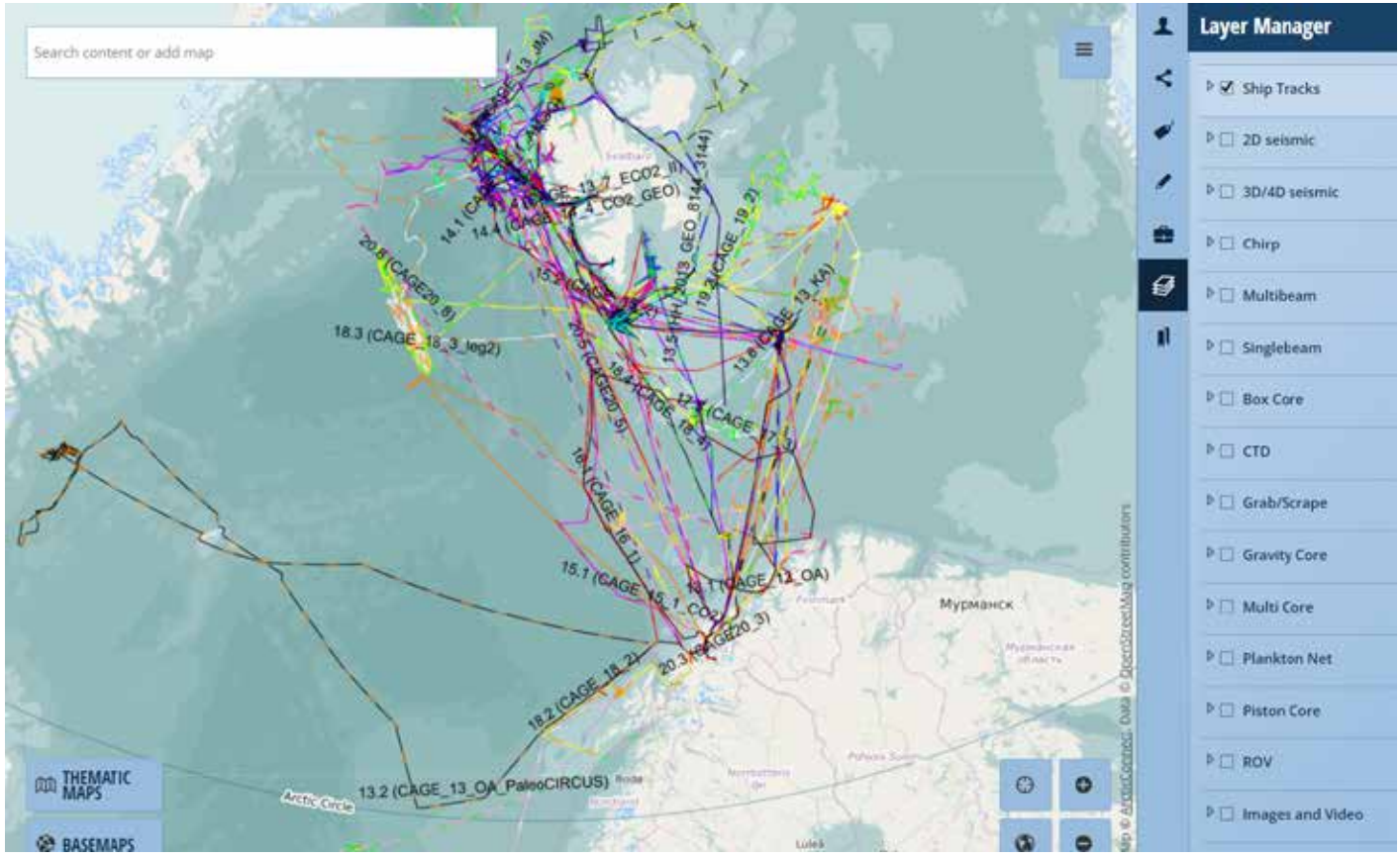
«Septentrio Academic Publishing» eies av UiT og er en tjeneste for åpen

publisering gitt av UiTs Universitetsbiblioteket. CAGEs åpningsside gir her enkel tilgang til sentrets årsrapporter, toktrapporter, vitenskapelige publikasjoner, PhD-oppgaver, vitenskapelig kommunikasjon og årsarkiv (Issue Archive).

Vitenskapelig kommunikasjon som pressemeldinger, toktblogger og nyhetsartikler skrevet av CAGE personell er lagret under «Science Communication», mens «Issue Archive» gir oversikt over hele arkivet for perioden 2013–2023, sortert etter år. Septentrio gir også lenke til CAGE digitale database under menyen «About». Denne rapportrekken vil være aktiv også etter CAGE er avsluttet i 2023, og sikrer dermed sentrets offentlige arv.

CAGE digitale database

CAGE digitale database er en kartbasert, brukervennlig portal til CAGE data og resultater. Under menyen «Layer Manager» får en kartoversikt over alt av data innsamlet



Skjermdump av CAGE digitale database. Databasen har en brukervennlig, kartbasert plattform, og kan nås direkte gjennom en lenke i CAGE data arkiv Septentrio (https://septentrio.uit.no/index.php/cage/database) der en klikker på "geodata web map".

CAGE sedimentkjernelager. Sedimentkjerner fra havbunnen som bringes inn fra forskningstokt blir organisert (hyller til høyre i bildet) og katalogisert som referanse og for eventuell senere bruk.
Foto: Fabio Sarti

av CAGE. En kan velge å få plottet kartoversikt over forskjellige typer data, og en kan sortere på årstall for perioden 2013–2023. Klikker en på selve datapunktene på kartet får en metadata; informasjon som beskriver hva som er innsamlet, hvilke analyser som er utført og lenke til toktrapport for forskningstoktet som samlet inn de aktuelle dataene.

Denne kartdatabasen har spilt en viktig rolle i sentrets åpen-data strategi. Opprinnelig ble den utviklet som en intern ressurs, der våre forskere raskt kunne få oversikt over hvilke data vi allerede hadde samlet inn de i geografiske områder de var interessert i.

Etter hvert ble databasen åpnet opp som en ressurs for alle som måtte ha interesse av slik informasjon. Det kartbaserte brukergrensesnittet for databasen er utviklet i samarbeid med UiTs IT-avdeling (ITA) og Asplan Viak, som blant annet utvikler digitale verktøy.

CAGE kjernelager

Referanseprøver av fysiske sedimentprøver som er samlet inn fra havbunnen i Arktis og sedimenter som er til overs etter de ønskede analyser er utført, er samlet i CAGE sedimentkjernelager, som er en del av Institutt for Geovitenskap (IG) ved UiT. IG sikrer logistikk og drift, og vil overta sedimentkjernene og prøvene fra CAGE når sentret avsluttes i 2023. En kartoversikt over lokalisering av sedimentene som er lagret i kjernelagret fins som et eget lag (Cores Repository) i CAGE digitale kartdatabase som en får tilgang til gjennom Septentrio (https://septentrio.uit.no/index.php/cage/database) der en klikker på "geodata web map". Også her er metadata tilgjengelig, og gir mer detaljert informasjon om hver sedimentkjerne.

Fabio Sarti er databaseleder (database manager) i CAGE og overingeniør ved Institutt for Geovitenskap, UiT – Norges Arktiske Universitet. Han har vært ansvarlig for datalagring og etablering av systemer for lagring, og for rapportering og statistikk for vitenskapelige resultater.
E-post: fabio.sarti@uit.no.

Karin Andreassen er professor i marin geologi og geofysikk ved UiT – Norges Arktiske Universitet. Hun har vært direktør for CAGE siden 2017, og var i perioden 2013–2016 assisterende direktør i sentret.
E-post: karin.andreassen@uit.no.

Tidløse gaveideer i museumsbutikken!

Skatten ble funnet i Tromsø høsten 2005, og datert av arkeologene til ca 900 e.Kr.

Kopi av motiv fra Sølvskatten

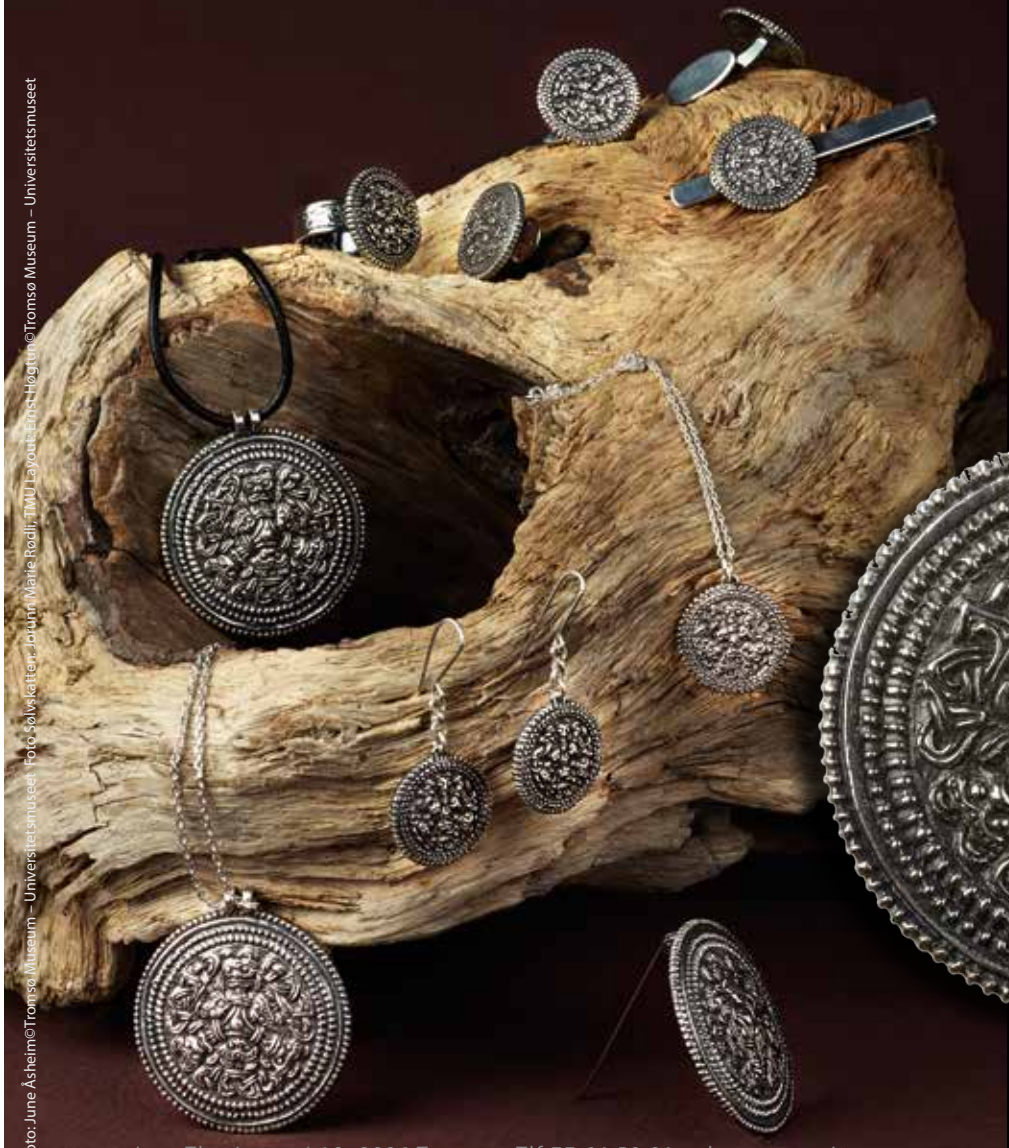


Foto: June Åsheim©Tromsø Museum – Universitetsmuseet, Foto Sølvskatten: Jotunn Marie Rødli, TMU Layout: Thor Høgtun©Tromsø Museum – Universitetsmuseet

Lars Thøringsvei 10, 9006 Tromsø • Tlf 77 64 50 01 • shop@tmu.uit.no

UiT Norges arktiske universitetsmuseum

Returadresse:
Ottar, Norges arktiske universitetsmuseum,
Norges arktiske universitet, Postboks 6050
Langnes, 9037 Tromsø
E-post: ottar@uit.no
Internett: uit.no/ottar