

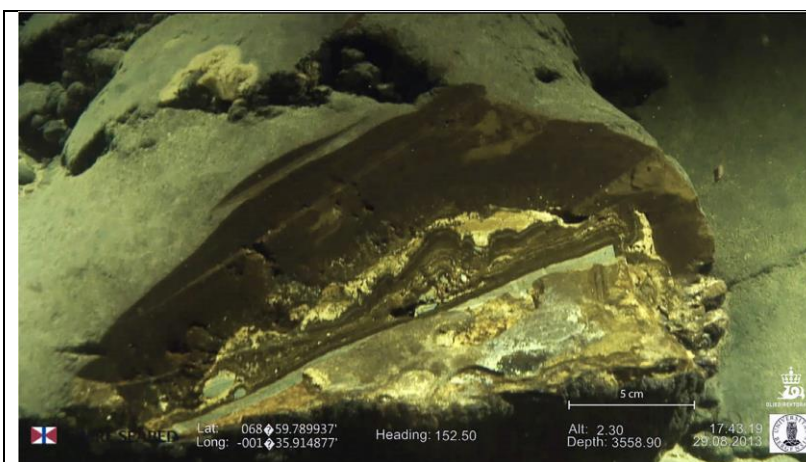
Oljedirektoratet

Teknologirapport havbunnsmineraler

Rapportnr.: 2020-1218, rev. 2

Dokumentnr.: 1231487

Dato: 2021-10-13



Over: Manganskorpe fra Norskehavet (Foto: Oljedirektoratet og Universitetet i Bergen)

Til høyre: Skorstein fra Oljedirektoratets tokt tatt på 3000 meters vanddyb på Mohnsryggen i Norskehavet (Foto: Jan Stenløkk, Oljedirektoratet)



Rapporttittel: Teknologirapport havbunnsmineraler
Oppdragsgiver: Oljedirektoratet
Professor Olav Hanssens vei 10
4021 STAVANGER
Kontaktperson: Bente Jarandsen / Sissel Eriksen
Dato: 2021-10-13
Prosjektnr.: 10267450
Org. enhet: Environmental Risk Management
Rapportnr.: 2020-1218 Rev. 2
Dokumentnr.: 1231487

DNV AS Energy Systems
Environmental Risk Management
Veritasveien 1
1363 Høvik
Norway
Tel: +47 67 57 99 00
NO 945 748 931

Levering av denne rapporten er underlagt bestemmelsene i relevant(e) kontrakt(er):
Avtale mellom Oljedirektoratet og DNV GL AS (nå DNV AS) vedrørende konsulentbistand til utarbeidelse av teknologirapport. Avtale signert 30. november 2020 med kontraktsnummer 2219.

Oppdragsbeskrivelse:

Konsulentbistand til utarbeidelse av teknologirapport - havbunnsmineraler

Utført av:



Jens Laugesen
Chief specialist



Kurt Aasly
Ass. professor, NTNU



Steinar Ellefmo
Ass. professor, NTNU

Verifisert av:

Tor Jensen
Vice President – Head of Section

Godkjent av:

Marianne Hauso
Head of Department

Beskyttet etter lov om opphavsrett til åndsverk m.v. (åndsverkloven) © DNV 2021. Alle rettigheter forbeholdes DNV. Med mindre annet er skriftlig avtalt, gjelder følgende: (i) Det er ikke tillatt å kopiere, gjengi eller videreformidle hele eller deler av dokumentet på noen måte, hverken digitalt, elektronisk eller på annet vis; (ii) Innholdet av dokumentet er fortrolig og skal holdes konfidensielt av kunden, (iii) Dokumentet er ikke ment som en garanti overfor tredjeparter, og disse kan ikke bygge en rett basert på dokumentets innhold; og (iv) DNV påtar seg ingen aktsomhetsplikt overfor tredjeparter. Det er ikke tillatt å referere fra dokumentet på en slik måte at det kan føre til feiltolkning.

DNV distribusjon:

ÅPEN. Fri distribusjon, intent og eksternt x

INTERN. Fri distribusjon internt i DNV.

KONFIDENSIELL. Distribusjon som angitt
distribusjonsliste. Distribution within DNV according to applicable
contract.*

HEMMELIG. Kun autorisert tilgang.

*Distribusjonsliste: Distribution list.

Nøkkelord:

Teknologirapport, utvinning, havbunnsmineraler,
sulfider, manganskorper

Rev.nr.	Dato	Årsak for utgivelser	Utført av	Verifisert av	Godkjent av
0	07.07.2021	Første utgave	JLAU	TJEN	MHAU
1	20.09.2021	Mottatt flere kommentarer fra OD	JLAU	TJEN	MHAU
2	13.10.2021	Mottatt ytterligere kommentarer fra OD	JLAU	TJEN	MHAU

INNHALDSFORTEGNELSE

SAMMENDRAG	5
FORKORTELSER	9
1 INTRODUKSJON	10
1.1 Oppdraget og rapporten	10
2 METODE OG ORGANISERING AV RAPPORTEN	13
2.1 Teknologiske utfordringer	13
2.2 Ytre faktorer som kan påvirke teknologivalg	15
2.2.1 Havdyp og relaterte utfordringer	15
2.2.2 Værforhold, signifikant bølgehøyde og peakperiode	15
2.2.3 Marin ising, sjøis og isfjell	18
2.2.4 Geotekniske forhold	24
2.3 Teknologisk modenhetsnivå	25
3 FOREKOMST AV HAVBUNNSMINERALER	26
3.1 Midthavsrygger generelt	27
3.1.1 Mohnsryggen	27
3.1.2 Knipovichryggen	27
3.2 Massive sulfider på havbunnen	27
3.2.1 Forekomster	28
3.2.2 Analoge forekomster på land	31
3.2.3 Mineralogi	32
3.3 Polymetallisk koboltrik manganskorpe	33
3.3.1 Geologi og dannelselse	33
3.3.2 Forekomster	34
3.3.3 Mineralogi	34
4 LETEAKTIVITET	35
4.1 Plattform for detektorer og verktøy	35
4.1.1 Overflatefartøy	35
4.1.2 Autonome plattformer	36
4.1.3 Fjernstyrte plattformer	37
4.2 Regional leteaktivitet	37
4.2.1 Eksempel på letestrategier for å finne sulfidforekomster	38
4.2.2 Regional letemetodikk	38
4.3 Lokal leteaktivitet	38
4.4 Utstyr for boring og prøvetaking på havbunnen	39
4.4.1 Norske initiativ	39
4.4.2 Andre initiativ	39
4.5 Oversikt over leteaktiviteter i utredningsområdet	41
4.6 Spesifikke metoder egnet for manganskorpe	41
5 UTVINNING AV HAVBUNNSMINERALER	42
5.1 Utvinning av havbunnsmineraler	42
5.1.1 Oversikt over teknologier for utvinning av havbunnsmineraler	42
5.1.2 Skjæremekanismer og verktøy	45
5.1.3 Foreslåtte konsepter for vertikal utvinning	46
5.1.4 Foreslåtte konsepter for horisontal mineralutvinning	52
5.2 Norsk aktivitet innen utvinning av havbunnsmineraler	60
5.3 Vurdering av anvendelighet	66
5.4 Vertikale transportsystemer	69
5.4.1 Innledning	69
5.4.2 Sensorer, kontroll- og instrumenteringssystemer	70

5.4.3	Oversikt over teknologier for vertikal transport	71
5.4.4	Konsepter for vertikal transport	72
5.5	Produksjonsstøttefartøy og utstyr på overflaten	80
5.5.1	Oversikt over teknologier	80
6	KOMPONENTLEVERANDØRER OG INNOVASJON.....	86
6.1	Kinesiske teknologier for utvinning av havbunnsmineraler	86
6.2	Leverandører av utstyr til utvinning av havbunnsmineraler i Norge	88
7	MILJØASPEKTER	90
7.1	Miljøforhold og habitater, norske mineralforekomster	90
7.1.1	Miljøpåvirkning ved utforskning (leting)	90
7.1.2	Miljøpåvirkninger fra utvinningsaktiviteter	91
7.2	Miljøpåvirkning knyttet til ressurs og utvinning av denne	96
7.3	Avbøtende tiltak	97
8	ANDRE UTFORDRINGER OG TEKNISKE TEMAER.....	98
8.1	Inspeksjon	98
8.2	Nødevakuering, søk og redning	99
8.3	Personelltransport	99
8.4	Vedlikehold og Service	99
8.5	Kommunikasjon	100
9	AVSLUTNING AV VIRKSOMHET – AVSLUTNINGSPLAN	102
10	OPPSUMMERING	103
11	REFERANSER.....	107
	APPENDIKS 1	114
	APPENDIKS 2	120

SAMMENDRAG

Regjeringen har igangsatt en åpningsprosess for mineralvirksomhet på den norske kontinentalsokkelen.

I henhold til havbunnsmineralloven skal det gjennomføres en konsekvensutredning som skal belyse hvilke virkninger en eventuell åpning kan få for miljøet og antatte næringsrelaterte, økonomiske og sosiale virkninger. Det er som en del av konsekvensutredningen behov for en teknologirapport som beskriver utforsknings- og utvinningsløsninger som kan være aktuelle i utredningsområdet.

Denne teknologirapporten beskriver utforsknings- og utvinningsløsninger for havbunnsmineraler som anses som aktuelle i utredningsområdet.

Mineralvirksomhet på store havdyp har spesielle miljømessige, teknologiske og kostnadmessige utfordringer sammenlignet med mineralvirksomhet på land. Utvinning av havbunnsmineraler er en helt ny industri, ikke bare i Norge, men på verdensbasis og det finnes så langt ingen igangsatte fullskala utvinningsprosjekter. Teknologier for utvinning av havbunnsmineraler er under utvikling, men det finnes i dag ingen ferdigutviklede teknologier for dette formålet.

Leteaktivitet globalt har søkelys på noder, og sulfider og skorper har lavere prioritet. Samtidig er det ikke regnet som sannsynlig å finne noder innenfor utredningsområdet.

Innenfor utredningsområdet langs Mohnsryggen og Knipovichryggen, er det hovedsakelig sulfidforekomster det vil være naturlig å lete etter. Avhengig av endelige rammebetingelser, vil leting kunne inkludere aktive og inaktive sulfidforekomster langs ryggen. Det vil antakelig, med tiden, kunne bli aktuelt å lete utenfor den sentrale spredningssonen etter inaktive forekomster som med havbunnsspredningen har beveget seg vekk fra selve ryggen. Disse kan være dekket av sedimenter av varierende tykkelse.

På Vøringplatået og utstikkeren mot Jan Mayen i tillegg til dyphavsområdene innenfor utredningsområdet, finnes manganskorpe på bart fjell på undersjøiske rygger og fjellformasjoner. Manganskorpen er avsatt på bart fjell over millioner av år og kan være inntil 20-talls cm tykk.

Mineralleting i utredningsområdet har pågått siden tidlig på 2000-tallet. Aktivitetene startet med forskningstokt utført av Universitetet i Bergen i 1998, som førte til oppdagelsen av en rekke hydrotermale systemer. OD har gjennomført egne årlige tokt siden 2018 for å kartlegge mineralforekomster i dyphavet på norsk kontinentalsokkel. I tillegg har OD også deltatt på flere vitenskapelige samarbeidstokt de siste årene med Universitetet i Bergen og Universitetet i Tromsø. Det er også utført andre tokt av NTNU (MarMine) i 2016 og av Geomar (Tyskland) i 2019.

Teknologirapporten er utarbeidet for Oljedirektoratet av DNV i samarbeid med NTNU og internasjonale eksperter.

Teknologirapporten beskriver aktuelle teknologier og teknologiutviklinger for utvinning av malm på havbunnen. Dette inkluderer mulige løsninger for hele operasjonen til havs; fra etablering av driftsområde og installasjon av utstyr til den skal transporteres til land. Rapporten legger særlig vekt på beskrivelse av de ulike teknologier og metoder for brytingen av malmen, heving av denne til overflaten og eventuell etterbehandling før transport til land for videre prosessering.

Rapporten dekker både sulfider og manganskorpeforekomster som er de forekomster som er funnet på den norske kontinentalsokkelen.

Det bemerkes spesielt at:

- I rapporten er det prøvd å få med mest mulig av kjente teknologier og relevante leverandører som finnes i markedet. Det må samtidig erkjennes at det også kan finnes andre teknologier (eller teknologier som er under utvikling), samt andre leverandører som tilbyr lignende løsninger som man ikke har fått med i rapporten. Videre finnes også noen teknologier som er under utvikling som leverandøren inntil videre ikke ønsker publisert.
- Det pågår en betydelig teknologiutvikling, spesielt på undervannsoperasjoner på store dyp, som vil kunne medføre at det vil være andre teknologier som vil bli tatt i bruk ved en mulig oppstart av utvinning av

havbunnsmineraler en gang i fremtiden. Dette begrunnes med at det forventes at teknologiutviklingen vil gå i retning av enda mer tilpasset utstyr for mineralutvinning og også med fokus på å minimere miljøpåvirkningen.

- En vurdering av teknologisk modenhetsnivå (TRL) av de forskjellige teknologiene som omtales i rapporten er utført av forfatterne. For å gjøre vurderingen mest mulig rettferdig og sammenlignbar så har TRL skalaen som brukes av EU vært brukt for alle teknologier / konsepter. Det er også utført en kontroll av at alle teknologier / konsepter er blitt vurdert på samme måte opp mot TRL-skalaen.
- Rapporten omtaler utvinningsløsninger for havbunnsmineraler, men det er ikke ensbetydende med at disse skal brukes i utredningsområdet. Valg av teknologi for utvinning, opptak, osv. vil være prosjektspesifikt og vil bli avklart i forbindelse med utbyggingsplaner for ev. konkrete prosjekt i fremtiden.
- Teknologirapporten estimerer ikke omfanget eller verdien av mineraler på den norske kontinentalsokkelen og begrenser seg til å beskrive de marine operasjoner (verdikjeden) som er relevante for dagens skisserte utvinningsløsninger.
- Rapporten er, hvor mulig, basert på fagfellevurderte publikasjoner, og for øvrig supplert med øvrige tilgjengelige publikasjoner. Det er videre utført intervjuer med fagekspert, samt naturligvis fagkunnskaper hos forfatterne av rapporten.

Gjennomgangen av utvinningsløsninger for havbunnsmineraler viser at det finnes en rekke teknologier under utvikling som vil kunne være aktuelle for utredningsområdet.

Hvis en ser på teknologiutviklingen på verdensbasis så er en kommet lengst med utvinningsløsninger for noder. For utvinning av sulfider og manganskorper, som er aktuelt for utredningsområdet, foreligger det mindre erfaringer da dette i mindre grad har vært prioritert.

Utvinning av sulfider og manganskorper har flere likheter med utvinning av noder og dette gjelder spesielt den vertikale transporten av malmen fra havbunnen til produksjonsstøttefartøyet og hvordan selve produksjonsstøttefartøyet er utstyrt. Den største forskjellen ligger i utstyret for innsamlingen av malmen på havbunnen; for nodulene som ligger løst i overflatesedimentene som opp til knyttnevestore «poteter» så har det vært utviklet forskjellige typer av beltegående utstyr som kan samle inn nodulene; sulfider og manganskorper må knuses / fragmenteres, eksempelvis med skjærende verktøy før de kan transporteres opp til overflaten.

- For utvinning av sulfider vil både vertikale og horisontale utvinningsteknologier være aktuelle. Her har man utstyr hvor man borer, skjærer og knuser på ulike måter. Det finnes en rekke konsepter:
 - Forekomster kan utvinnes med grøftkuttere eller borestrenger med stor diameter som er montert på selvgående havbunnskonstruksjoner.
 - Alternativt kan det brukes et skjæreverktøy med en diameter som er mindre enn hullet som skal utvinnes. Skjæreverktøyet kan flyttes slik at skjæreflaten utvides og dermed gjøres hullet kontinuerlig større.
 - Det er også muligheter for å koble til enheter som knuser malmen på sjøbunnen slik at den lettere kan pumpes opp til overflaten via et stigerør.

Valget av teknologi for utvinning av sulfider vil bl.a. avhenge av geometri og kvalitet på sulfidforekomsten (utbredelse, dybde, gehalt) og behov for knusing og av type vertikaltransport til overflaten.

- For utvinning av manganskorper vil horisontale utvinningskonsepter være (mest) aktuelle. Her bryter / skjærer man skorpen og kanskje noe av det underliggende substratet, samt eventuelle sedimenter. De fleste av de kjente horisontale konseptene benytter ett eller flere beltegående utstyr.
 - Det finnes en rekke konsepter med beltegående utstyr med forskjellige typer roterende kutterhoder for utvinning av skorper. Utstyret ligner på det som brukes til mudring i harde masser / stein.

- Et annet konsept for skorpeutvinning er basert på en vannjet og en vibrator for å knuse skorpen i fragmenter som er små nok til å samles og transporteres til løftesystemet.
- Som nevnt over finnes det også konsepter der vertikale verktøy brukes for skorper. Denne tilnærmingen kan spesielt være relevant for tykkere skorper.

Valget av teknologi for utvinning av manganskorper vil bl.a. avhenge av arealet som skal utvinnes. I mange tilfeller er det betydelige areal, men en begrenset tykkelse på skorpen. Det krever utstyr som lett kan forflytte seg over større areal. Er skorpen litt tykkere kan som nevnt også vertikale utvinningskonsepter være aktuelle. Bratt terreng kan også være en utfordring som setter klare krav til den foretrukne løsningen.

De forskjellige utvinningsløsningene har generelt forholdsvis lavt teknologisk modenhetsnivå (TRL), som henger sammen med at de i hovedsak fortsatt er på konseptnivå / labnivå. Mange av utvinningsløsningene bygger på svært lignende utstyr og teknologier som i dag brukes spesielt innenfor olje- og gassvirksomhet til havs. Det forventes at den eksisterende kunnskapen fra olje og gass vil være til stor nytte ved operasjonalisering av utvinning av havbunnsmineraler på den norske kontinentalsokkelen.

Det finnes en rekke norske teknologiløsninger / konsepter som er interessante, to eksempler er:

- Norske selskaper er kommet langt i utviklingen av ROVer og AUVer som kan utføre en rekke operasjoner på havbunnen. De vil kunne modifiseres slik at de kan brukes i forskjellige operasjoner tilknyttet utvinning av sulfider og manganskorper.
- Norske selskaper er langt fremme innen skipsteknologi basert på lave eller ingen CO₂-utslipp til atmosfæren, bl.a. ved bruk av LNG, batterier eller hybridløsninger istedenfor marin diesel. Dette har stor betydning for utslipp til luft fra utvinning av havbunnsmineraler hvor produksjonsstøttefartøyet vil kunne være kontinuerlig på utvinningsstedet over lang tid (måneder / år).

Det finnes noen viktige ytre faktorer som medfører at dypmarin mineralutvinning innenfor utredningsområdet vil skille seg ut. Dette gjelder spesielt vær- og isforhold:

- Værforholdene er «barskere» enn mange andre steder i verden; i området ved Mohnsryggen hvor det er funnet forekomster av både sulfider og manganskorper og den mest sannsynlige bølgehøyden er mellom 0,75 – 1,5 meter (signifikant bølgehøyde for 3-timers registreringer). Dette setter spesielle krav til utbyggingsløsningen.
- Marin ising, sjøis og isfjell er en utfordring i de nordlige delene av utredningsområdet. Med henblikk på marin ising så kan det være en isingsrate på opptil 10 cm/time om vinteren (høyest i januar). Hvis fartøyet blir sterkt nediset, kan det i verste fall utgjøre en fare for stabiliteten og integriteten til fartøyet. Det kan derfor være hensiktsmessig at der hvor marin ising kan være et problem å hensynta dette ved å bruke designløsninger for å motvirke ising. En må også regne med at det kan være sjøis i de nordlige delene av utredningsområdet i deler av året. Sjøis vil kunne representere en utfordring for et fartøys evne til å holde posisjon eller anlagt kurs. Mulighet for isfjell og kollisjon med fartøy kan heller ikke neglisjeres i utredningsområdet.

Disse ytre faktorene setter krav til utstyr til mineralutvinning på den norske kontinentalsokkelen og da spesielt til produksjonsstøttefartøyet og tilkobling til vertikale transportløsninger for malmen fra sjøbunnen. Det kan være aktuelt å bruke regelverk for å ivareta disse utfordringene, som for eksempel klasseselskapenes isklasse og IMOs polarkode for fartøyer.

En meget viktig problemstilling er hvilke miljøaspekter som er knyttet til påvirkningen fra utvinning av havbunnsmineraler i utredningsområdet. De viktigste miljøpåvirkningene fra utvinning av mineralforekomster er forventet å opptre som følge av:

- Direkte fjerning og ødeleggelse av substrat / habitater
- Endringer i geokjemiske og fysiske egenskaper til havbunnen

- Partikkelskyer og oppvirvling av sedimenter
- Utslipp av forurensningsstoffer og endring av de fysiske egenskaper til vannmassene
- Støy, vibrasjoner og lys

I tillegg forventes utslipp til luft og til sjø fra fartøy (bruks- eller prosessrelaterte kjemikalier).

Miljøpåvirkningen ved leting forventes å ha en betydelig lavere påvirkning enn fra utvinning av havbunnsmineraler. Dette henger sammen med at leteaktiviteten kun har meget lokal påvirkning og aktiviteten pågår over kortere tid.

Det finnes flere tekniske løsninger for å minimere påvirkningen fra utvinning av mineraler på havbunnen:

- Velge utstyr som gir minst mulig miljøpåvirkning
- Utvikling av selektiv sugeteknologi for å minimere partikkelspredning og mengde sedimenter som suges opp
- Skjørt / kapper kan monteres på maskineri som opererer på bunnen som hindrer spredning av partikler og reduserer fotavtrykket og miljøeffektene
- Valg av utslippspunkt og teknisk utforming av utslippsrør vil påvirke retning og potensielt nedslagsområde for partikler
- Vurdering av hvor returvann og partikler bør slippes for at miljøeffektene skal bli mindre
- Rensing av returvann
- Justering av temperatur og / eller salinitet til returvannet

Det finnes også ikke-tekniske avbøtende tiltak som habitatrestaurering, hvor man forsøker å danne et grunnlag for reetablering av biodiversiteten som opprinnelig eksisterte, ved å gjenskape substrater som kan rekoloniseres. Et annet ikke-teknisk tiltak er å avsette områder som vernes og forblir urørt av utvinningsaktiviteter.

På grunn av at mineralutvinningen normalt vil foregå langt fra land så vil det også være ekstra utfordringer knyttet til forsyninger og mannskapsbytter på produksjonsstøttefartøyet. De største utfordringene forventes imidlertid å være knyttet til beredskap, det vil si for nødevakuering, søk og redning, disse er imidlertid til stor del allerede godt utredet i forhold til petroleumsvirksomhet i utfordrende områder.

Fysiske inspeksjoner og tilsyn på store havdyp vil være krevende og det vil derfor være relevant å basere en stor del av dette på fjernovervåking hvor data innsamles fra sensorer på havbunnen og på fartøyet og sendes via kommunikasjonssatellitter til land. Det er imidlertid gradvis mindre dekning for satellitt-kommunikasjon når en kommer lenger nord fordi satellittene er i polar bane. Videre vil en kunne bruke overvåkingssatellitter til å visuelt følge med på hva som skjer på utvinningslokaliteten.

Det er varierende type og omfang av annen virksomhet i utredningsområdet, generelt er denne virksomheten begrenset. Virkninger av annen virksomhet vil bli adressert i andre studier som del av konsekvensutredningen.

FORKORTELSER

Under følger en oversikt over forkortelser brukt i rapporten.

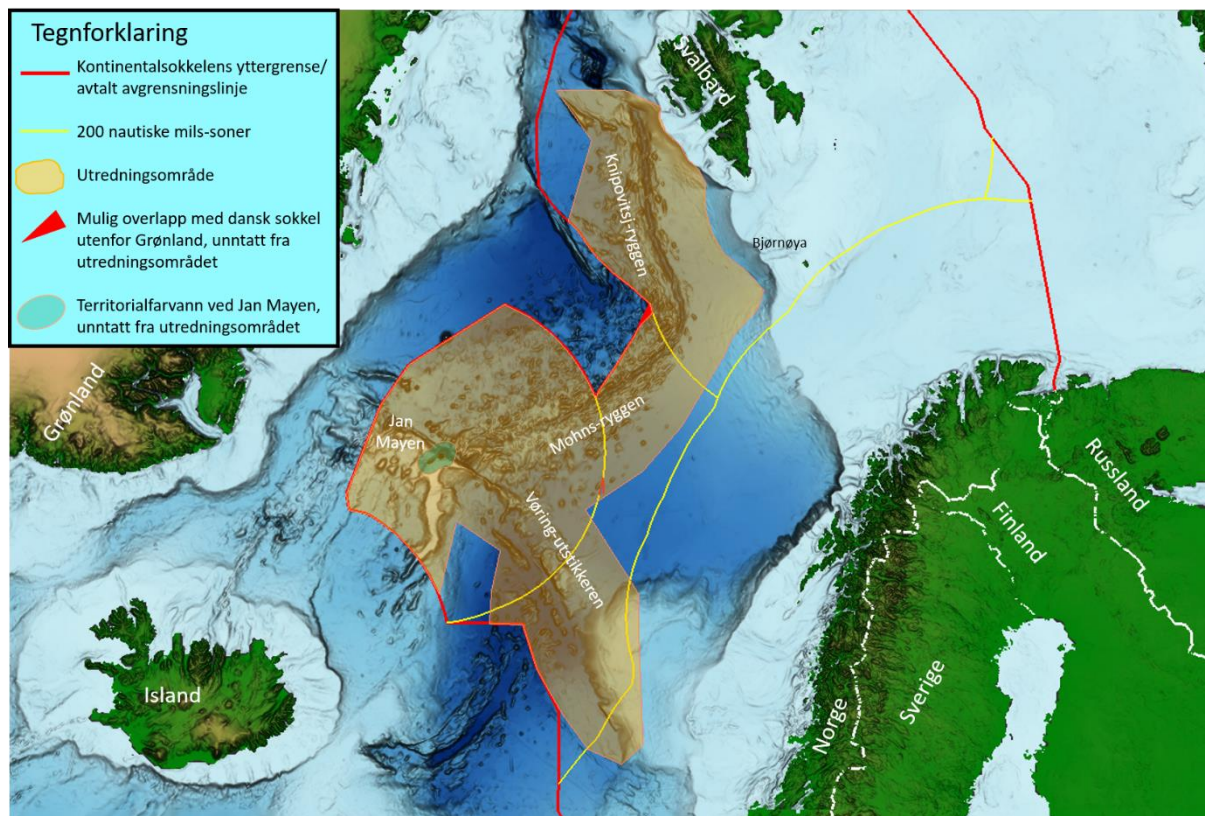
<i>Forkortelse</i>	<i>Beskrivelse</i>
AUV	Autonomous Underwater Vehicle, autonomt undervannsfartøy
AVR	Axial Volcanic Ridge
CCZ	Clarion-Clipperton zone
CRC	Koboltrike- eller polymetalliske manganskorper
CSEM	Controlled Source Electro Magnetics
CTD	Conductivity, Temperature, Depth. Ledningsevne, temperatur og dyp.
DSM	Deep Sea Mining
EBS	Environmental Baseline Study
EBSA	Ecologically or Biologically Significant Marine Areas
EEZ	Exclusive Economic Zone, Eksklusiv økonomisk sone
IMO	International Maritime Organization
ISA	International Seabed Authority
ISO	International Organization for Standardization
km	Kilometer
OSPAR	Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic
PMN	Polymetalliske mangannoduler
ROV	Remotely operated vehicle (small, unmanned submarine). Fjernstyrt undervannsfarkost
SMS	Seafloor Massive Sulphides, massive sulfidforekomster
SC	Self Compensating (brukt for magnetometri)
TEM	Transient Electro Magnetics
VTS	Vertical Transportation System, system for vertikaltransport
WROV	Work class ROV, større ROV

I Appendiks 2 er et utvalg av de begreper som er brukt i rapporten forklart nærmere.

1 INTRODUKSJON

1.1 Oppdraget og rapporten

Denne teknologirapporten beskriver utvinningsløsninger for havbunnsmineraler som anses som aktuelle på den norske kontinentalsokkelen. Nærmere bestemt i området mellom Jan Mayen og Svalbard og sørøst for Jan Mayen hvor Regjeringen har igangsatt en åpningsprosess for mineralvirksomhet innenfor utredningsområdet, se Figur 1.



Figur 1 Kartet viser utredningsområdet (brunfarget sone) hvor Regjeringen har igangsatt en åpningsprosess for mineralvirksomhet. Kilde: OED og OD.

Teknologirapporten er utarbeidet på oppdrag for Oljedirektoratet av DNV AS i samarbeid med NTNU og internasjonale eksperter.

I henhold til havbunnsmineralloven skal det gjennomføres en konsekvensutredning som skal belyse hvilke virkninger en eventuell åpning kan få for miljøet og antatte næringsrelaterte, økonomiske og sosiale virkninger. Det er som en del av konsekvensutredningen behov for en teknologirapport som beskriver utforsknings- og utvinningsløsninger som kan være aktuelle i utredningsområdet.

Teknologirapporten ser på aktuelle teknologier og teknologiutviklinger for utvinning av malm fra havbunnen. Dette inkluderer mulige løsninger for hele operasjonen; fra etablering av driftsområde og installasjon av utstyr, heving til overflaten, til den skal transporteres til land. Rapporten legger særlig vekt på beskrivelse av de ulike teknologier og metoder for brytingen av malmen, heving av denne til overflaten og eventuell etterbehandling før transport til land og videre prosessering. Teknologirapporten estimerer ikke omfanget eller verdien av mineraler innenfor utredningsområdet og begrenser seg til å beskrive de operasjoner som er relevante for utvinningsløsningene.

Det at rapporten omtaler utvinningsløsninger for havbunnsmineraler er ikke ensbetydende med at disse skal brukes i utredningsområdet. Denne rapporten skal bidra til å gi et faglig grunnlag som del av konsekvensutredningen ved å gi informasjon om mulige utvinningsteknologier og status innen teknologiutvikling.

Rapporten dekker både sulfider og mangankorpeforekomster som er de forekomster som er funnet innenfor utredningsområdet. Det er ikke funnet mangannoduler innenfor området. Dette henger sammen med at mangannoduler kun dannes der hvor sedimenttilgangen er svært begrenset. Havområdet på norsk sokkel som ligger mellom Norge og Grønland er så smalt at sedimenter tilføres fra land så raskt at mangannodulene ikke får tid til å vokse (BarentsWatch, 2018).

Rapporten er basert på:

- fagfelleverderte publikasjoner
- andre publikasjoner
- intervjuer med fageksperter / fagkunnskaper til forfatterne av rapporten

Rapportens omtale av teknologier inneholder en stor mengde bilder og beskrivelser fra forskjellige leverandører. Forfatterne av rapporten har prøvd å få med mest mulig av teknologier og leverandører som finnes i markedet. Det må samtidig erkjennes at det også kan finnes andre teknologier (eller teknologier som er under utvikling) samt andre leverandører som tilbyr lignende løsninger som man ikke har fått med i rapporten. Det finnes også noen teknologier som er under utvikling hvor leverandøren inntil videre ikke ønsker omtale.

Det understrekes også at det pågår en betydelig teknologiutvikling innen andre næringssegmenter, spesielt på undervannsoperasjoner på store dyp, som vil kunne medføre at det vil være andre teknologier enn det som er presentert i denne rapporten som vil bli tatt i bruk ved en oppstart av utvinning av havbunnsmineraler en gang i fremtiden.

Vurderingene av teknologisk modenhetsnivå (TRL) av de forskjellige teknologiene som omtales i rapporten er utført av forfatterne. Forfatterne er klar over at vurderingen av teknologisk modenhetsnivå kan være et følsomt tema for mange leverandører av slike teknologier. For å gjøre det mest mulig rettfærdig så har forfatterne brukt TRL skalaen som brukes av EU for alle teknologier / konsepter og etterpå også kontrollert at alle teknologier / konsepter er blitt vurdert på samme måte opp mot TRL-skalaen.

Rapporten er utarbeidet av Jens Laugesen (prosjektleder, DNV), Steinar Ellefmo (NTNU) og Kurt Aasly (NTNU). Laugesen har en PhD innen forurensede sedimenter og arbeider til daglig som sjefsspesialist i DNV med bl.a. ansvar for havbunnsmineraler. Ellefmo har en PhD i teknisk ressursgeologi, og arbeider til daglig som førsteamanuensis innen dette fagområdet ved NTNU. Aasly har en PhD i ressursgeologi, og arbeider til daglig som førsteamanuensis i prosessmineralogi ved NTNU.

Bistand til rapporten er gitt av:

- Sebastian Volkmann (eget firma, Blue Mining Consulting) - som har bidratt med kunnskap om internasjonale erfaringer fra utvinning av havbunnsmineraler, spesielt om selve utvinningen på havbunnen. Volkmann har en Dr.-Ing. grad innen utvinning av havbunnsmineraler fra RWTH Aachen.
- Steffen Knodt (eget firma, AixLabs) - som har bidratt med kunnskap om internasjonale erfaringer fra utvinning av havbunnsmineraler, spesielt om hvordan havbunnsmineralene fraktes fra havbunnen til havoverflaten og vedrørende produksjonsstøttefartøyet. Knodt har en Dr.-Ing. grad i produksjonsteknologi fra RWTH Aachen.
- Arve Lepsøe (DNV) – som har bidratt med kunnskap om de maritime operasjoner som inngår i utvinning av havbunnsmineraler (spesielle tekniske løsninger og forhold til andre brukere). Lepsøe er utdannet sivilingeniør innen nautikk fra NTNU.
- Øyvind Fjukmoen (DNV) – som har bidratt med kunnskap om de miljøpåvirkninger som utvinning av havbunnsmineraler medfører. Fjukmoen har en M.Sc i marinbiologi fra Universitetet i Bergen.



I tillegg har en rekke nasjonale og internasjonale forskere og fageksperter fra NTNU, DNV og andre institusjoner bidratt med informasjon og vitenskapelige artikler.

Det er gjennomført flere møter og workshops med Oljedirektoratet underveis i prosjektet hvor det bl.a. er gitt en oppsummering med informasjon fra de tokt som er utført for å kartlegge havbunnsmineraler innenfor utredningsområdet (Appendiks 1). Videre er det gitt innspill til innhold og oppbygging av rapporten.

Det har også vært holdt flere korte presentasjonsmøter med selskaper som leverer teknologiløsninger til utvinning av havbunnsmineraler.

2 METODE OG ORGANISERING AV RAPPORTEN

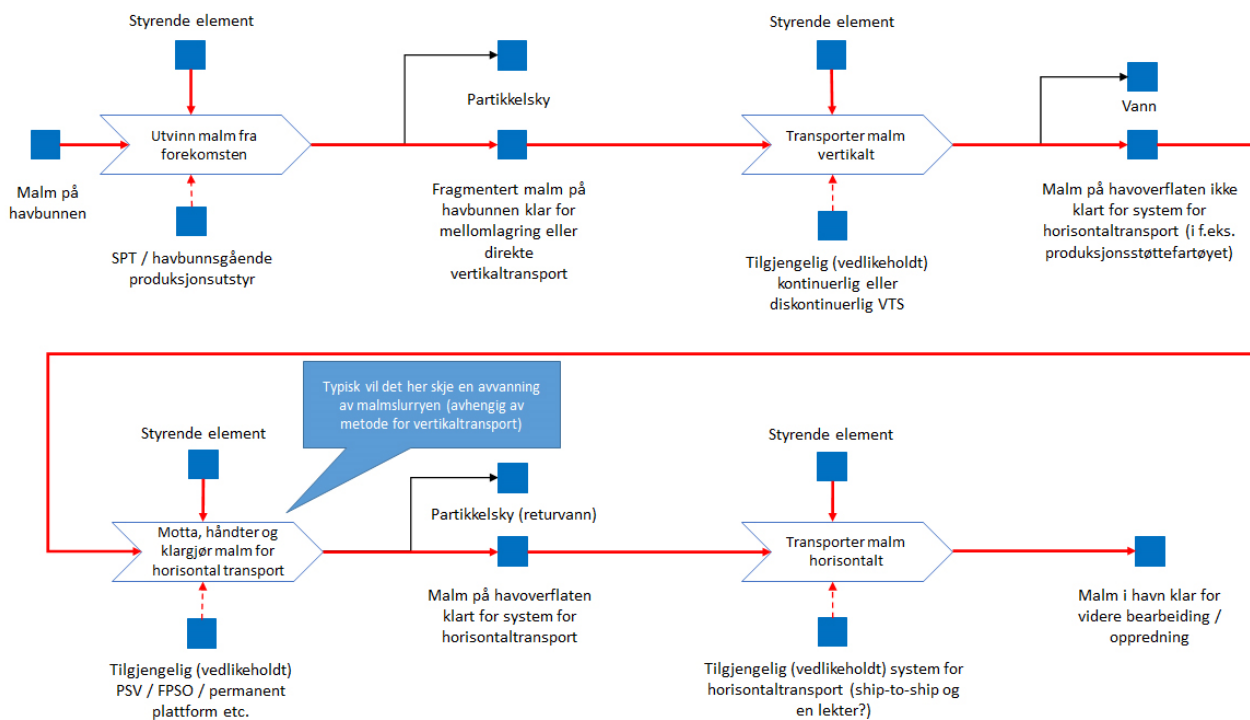
Rapporten er inndelt slik at den skal ha en logisk rekkefølge hvor en først beskriver tekniske og ytre faktorer som er vesentlige ved vurdering av utvinningsteknologier fulgt av beskrivelse av forekomst og leting etter havbunnsmineraler. Etter det følger en beskrivelse av utvinningsteknologier, leverandører, miljøaspekter og til slutt hvordan utvinningsprosjekter avsluttes samt en oppsummering.

Kapittelinnholdingen er følgende:

- Teknologisk utfordringer (kapittel 2.1) samt ytre faktorer (kapittel 2.2) som kan påvirke valget av teknologi for leting og utvinning av havbunnsmineraler. Hvordan vurderes det teknologiske modenhetsnivået av de forskjellige utvinningsteknologiene som beskrives i rapporten (kapittel 2.3)
- Hvilke forekomster av havbunnsmineraler finnes (med fokus på den norske kontinentalsokkelen og utredningsområdet) (kapittel 3)
- Hvordan foregår leting etter havbunnsmineraler (kapittel 4)
- Hvilke utvinningsteknologier finnes for havbunnsmineraler (med fokus på de som er egnet for den norske kontinentalsokkelen og utredningsområdet) (kapittel 5)
- Hvem leverer komponenter og innovative løsninger til utvinning av havbunnsmineraler (kapittel 6)
- Hvilke miljøaspekter er knyttet til utvinning av havbunnsmineraler (kapittel 7)
- Hvilke andre utfordringer og tekniske temaer er knyttet til utvinning av havbunnsmineraler (kapittel 8)
- Hvordan avsluttes et prosjekt hvor man utvinner havbunnsmineraler (kapittel 9)
- Oppsummering (kapittel 10)

2.1 Teknologiske utfordringer

Gitt at en forekomst er funnet og beskrevet i tilstrekkelig detalj til at man kan forstå og minimere miljøkonsekvenser, utvikle best egnet brytningsmetode og utnytte det potensialet som ligger i forekomsten, starter utvinningen med selve uttaket av malmen. Man bruker havbunnsstående produksjonsutstyr og uttaket styres av planer, lover, forskrifter og prosedyrer («Styrende element» i Figur 2). Resultatet av denne prosessen er at man har malm på havbunnen klar for mellomlagring eller direkte vertikaltransport. Et mulig, men uønsket resultat er en partikkelsky som man må minimere. Neste steg er vertikaltransport opp til produksjonsstøttefartøyet med klargjort og vedlikeholdt utstyr. Når malmen er på fartøyet på havoverflaten må malmslurrien (avhengig av metode for vertikaltransport) avvannes og mellomlagres før overføring til bulkfartøy og horisontal transport. Etter horisontal transport er malmen klar for videre bearbeiding. En generell verdikjede med støttende (nedenfra og opp i aktivitetene) og styrende (ovenfra og ned i aktivitetene) element er presentert i Figur 2.



Figur 2 Flytskjema for verdikjeden for utvinning av havbunnsmineraler.

Overordnet kan man si at de viktigste teknologiske (hoved-) utfordringene for utvinning av havbunnsmineraler er:

- Hvordan utvinne malmen nede på havbunnen effektivt med minimal miljøpåvirkning
- Kostnadseffektiv vertikaltransport av malmen fra havbunnen til produksjonsstøttefartøyet, samt håndtering av vertikaltransportsystemet
- Forberede malmen på produksjonsstøttefartøyet for transport til land, samt overføring av malm til bulkfartøyet

Inkludert i disse utfordringene ligger det elementer av oppskalering utfordringer, integrering av delsystemer i utfordrende vær og lokale forhold på havoverflaten og på havbunnen (sedimenter, helninger varierende havbunnstopografi etc.). Videre er det utfordringer knyttet til energiproduksjon og lagerplass på den foretrukne løsningen på havoverflaten (topside), samt overføring av malm fra produksjonsstøttefartøyet til fraktfartøyet under de rådende forholdene innenfor utredningsområdet.

Det er også utfordringer knyttet til vertikaltransport grunnet slitasje i stigerøret. Forekomstene er til dels porøse, og det er boreutfordringer i forbindelse med leting etter og avgrensning av forekomster. Forsøk har vist at man til nå har problemer med å få opp større andeler av borekjernene man borer. Dette er en forutsetning for å forstå forekomstgeometri og interne kvalitetsvariasjoner. Både ved leting og avgrensning og ved utvinning vil det være behov for system for (miljø-) overvåking. Fortrinnsvis bør dette være autonome systemer. Slike systemer med rask kommunikasjon (høy båndbredde) mellom havoverflaten og havbunnen er ikke testet.

Det bør være mulig å løse mange av disse utfordringene, og i Norge har man mye kompetanse om marine operasjoner og relevante tekniske løsninger, men de er i liten grad testet på så store dyp og ved de utfordrende værforholdene.

2.2 Ytre faktorer som kan påvirke teknologivalg

Det er en rekke ytre faktorer som er relevante for valget av teknologi for leting og utvinning av havbunnsmineraler. For det aktuelle utredningsområdet er følgende faktorer vurdert å være spesielt viktige:

- Havdyp og relaterte utfordringer
- Værforhold, signifikant bølgehøyde og peakperiode
- Marin ising, sjøis og isfjell
- Geotekniske forhold

I de følgende delkapitlene er disse faktorene nærmere beskrevet og hvordan vær- og isforhold varierer over året.

2.2.1 Havdyp og relaterte utfordringer

Mange steder hvor det er påvist havbunnsmineraler er det svært store havdyp. Havdyp på opp til ca. 4000m, som er forventet i utredningsområdet, stiller store utfordringer til mulig utvinning av havbunnsmineraler. Det kreves fjernstyrt utstyr som skal fungere under ekstreme fysiske forhold. Det vil være betydelige forskjeller både i trykk, temperatur, tetthet og salinitet. Det er også registrert variable strømningsforhold innenfor utredningsområdet. Ved en aktiv skorstein kan f.eks. den utgående vannstrømmen / vanddampen fra sjøbunnen ha en temperatur på 350 °C.

En følge av de store havdypene er at utstyr må testes og godkjennes spesielt for så store dyp og utvikling og bygging av utstyr vil også være ekstra kostbart.

Valg av robust og pålitelig utstyr for utvinning på store havdyp er derfor et meget viktig punkt.

2.2.2 Værforhold, signifikant bølgehøyde og peakperiode

For kort å beskrive værforholdene i Norskehavet og dermed ha et grunnlag for å diskutere egnetheten til ulike teknologier, er signifikant bølgehøyde (H_s) gitt i meter og peakperiode (T_p) gitt i sekunder analysert overordnet. Data er fra NORA10-databasen (Reistad et al. 2011). Anvendt database gir vind- og bølgeinformasjon for hver tredje time for hele den norske kontinentalsokkelen og inkluderer data fra 1. september 1957 til 30. Juni 2015. Dataene er fra to lokasjoner som vist i Tabell 1 og Figur 3.

Tabell 1 Koordinater til lokasjoner for bølgeanalysen.

Lokasjon	Lengdegrad	Breddegrad
Mohns_1	-5.33	71.33
Mohns_5	8.15	73.61



Figur 3 Lokasjoner for bølgeanalysen, Mohns_1 og Mohns_5

Under antagelsen at Hs og Tp er uavhengige, er simultan sannsynlighet (joint probability) beregnet for de to lokasjonene. Merk at intervallbredden er ulik for Hs og Tp. Marginalfordelingene for Hs og Tp er beregnet ved å telle antall data som faller innenfor de ulike intervallene og dele på totalt antall datapunkt i datasettet. Simultanfordelingen er estimert som produktet av marginalfordelingene. Figur 4 og Figur 5 gir marginal- og simultanfordelingen til henholdsvis punkt Mohns_1 og Mohns_5.

En ser at det i punkt Mohns_1 er mest sannsynlig at Hs er mellom 0,75 og 1,5 meter (27,4%, angitt i Figur 4 som midtpunktet 1,125) og at Tp er mellom 7,6 og 9,5 (28,85%, angitt i Figur 4 som midtpunktet 8,55). Tilsvarende tall for Mohns_5 er 37,1% sannsynlighet for at Hs er mellom 0,75 og 1,5 meter og 28,58% sannsynlighet for at Tp er mellom 5,7 og 7,6.

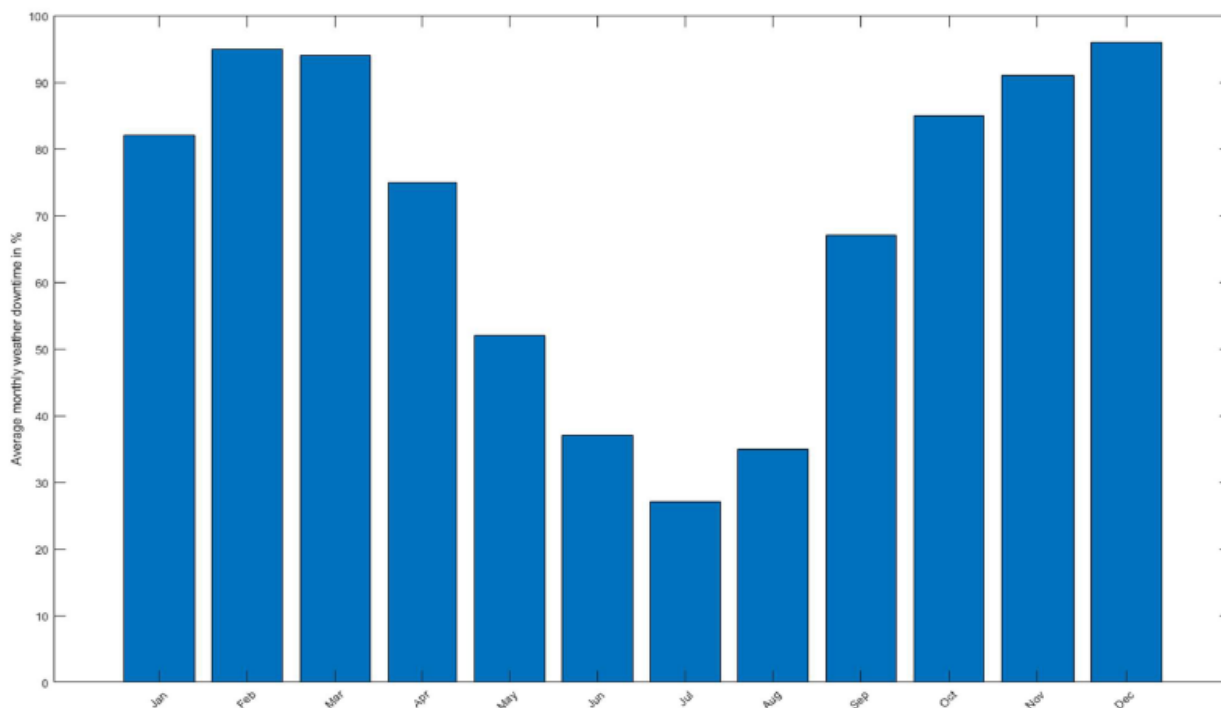
		Tp											
		0.95	2.85	4.75	6.65	8.55	10.45	12.35	14.25	16.15	18.05	19.95	21.85
Hs	Probability	0.00 %	0.07 %	6.66 %	26.43 %	28.85 %	25.53 %	7.36 %	4.52 %	0.34 %	0.17 %	0.06 %	0.01 %
0.375	3.7 %	0.00 %	0.00 %	0.24 %	0.97 %	1.06 %	0.94 %	0.27 %	0.17 %	0.01 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %
1.125	27.4 %	0.00 %	0.02 %	1.83 %	7.25 %	7.92 %	7.01 %	2.02 %	1.24 %	0.09 %	0.05 %	0.02 %	0.00 %
1.875	23.4 %	0.00 %	0.02 %	1.56 %	6.17 %	6.74 %	5.96 %	1.72 %	1.06 %	0.08 %	0.04 %	0.01 %	0.00 %
2.625	18.8 %	0.00 %	0.01 %	1.25 %	4.97 %	5.42 %	4.80 %	1.38 %	0.85 %	0.06 %	0.03 %	0.01 %	0.00 %
3.375	10.5 %	0.00 %	0.01 %	0.70 %	2.77 %	3.03 %	2.68 %	0.77 %	0.47 %	0.04 %	0.02 %	0.01 %	0.00 %
4.125	7.4 %	0.00 %	0.00 %	0.50 %	1.97 %	2.15 %	1.90 %	0.55 %	0.34 %	0.03 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %
4.875	3.7 %	0.00 %	0.00 %	0.25 %	0.99 %	1.08 %	0.95 %	0.28 %	0.17 %	0.01 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %
5.625	2.4 %	0.00 %	0.00 %	0.16 %	0.64 %	0.70 %	0.62 %	0.18 %	0.11 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
6.375	1.2 %	0.00 %	0.00 %	0.08 %	0.31 %	0.34 %	0.30 %	0.09 %	0.05 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
7.125	0.8 %	0.00 %	0.00 %	0.05 %	0.20 %	0.22 %	0.20 %	0.06 %	0.03 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
7.875	0.3 %	0.00 %	0.00 %	0.02 %	0.09 %	0.10 %	0.09 %	0.03 %	0.02 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
8.625	0.2 %	0.00 %	0.00 %	0.01 %	0.05 %	0.05 %	0.05 %	0.01 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
9.375	0.1 %	0.00 %	0.00 %	0.01 %	0.02 %	0.02 %	0.02 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
10.125	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.01 %	0.01 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
10.875	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
11.625	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
12.375	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
13.125	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
13.875	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

Figur 4 Marginal- og simultanfordeling (Hs og Tp) ved lokasjon Mohns_1. Hs og Tp har samme oppløsning i databasen, dvs. et datapunkt for hver tredje time.

		Tp											
Hs		0.95	2.85	4.75	6.65	8.55	10.45	12.35	14.25	16.15	18.05	19.95	21.85
Mid point	Probability	0.00 %	0.06 %	8.47 %	28.58 %	27.39 %	22.20 %	6.53 %	5.59 %	0.72 %	0.33 %	0.10 %	0.04 %
0.5	12.1 %	0.00 %	0.01 %	1.03 %	3.46 %	3.31 %	2.69 %	0.79 %	0.68 %	0.09 %	0.04 %	0.01 %	0.00 %
1.5	37.1 %	0.00 %	0.02 %	3.14 %	10.60 %	10.16 %	8.23 %	2.42 %	2.07 %	0.27 %	0.12 %	0.04 %	0.01 %
2.5	24.7 %	0.00 %	0.02 %	2.09 %	7.05 %	6.75 %	5.47 %	1.61 %	1.38 %	0.18 %	0.08 %	0.02 %	0.01 %
3.5	13.4 %	0.00 %	0.01 %	1.14 %	3.84 %	3.68 %	2.98 %	0.88 %	0.75 %	0.10 %	0.04 %	0.01 %	0.00 %
4.5	6.9 %	0.00 %	0.00 %	0.59 %	1.98 %	1.90 %	1.54 %	0.45 %	0.39 %	0.05 %	0.02 %	0.01 %	0.00 %
5.5	3.3 %	0.00 %	0.00 %	0.28 %	0.95 %	0.91 %	0.74 %	0.22 %	0.19 %	0.02 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %
6.5	1.5 %	0.00 %	0.00 %	0.12 %	0.42 %	0.40 %	0.32 %	0.10 %	0.08 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
7.5	0.6 %	0.00 %	0.00 %	0.05 %	0.18 %	0.17 %	0.14 %	0.04 %	0.04 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
8.5	0.2 %	0.00 %	0.00 %	0.02 %	0.07 %	0.06 %	0.05 %	0.02 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
9.5	0.1 %	0.00 %	0.00 %	0.01 %	0.03 %	0.02 %	0.02 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
10.5	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.01 %	0.01 %	0.01 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
11.5	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
12.5	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
13.5	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
14.5	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
15.5	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
16.5	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
17.5	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
18.5	0.0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %

Figur 5 Marginal- og simultanfordeling (Hs og Tp) ved lokasjon Mohns_5. Hs og Tp har samme oppløsning i databasen, dvs. et datapunkt for hver tredje time.

Analysene presentert i Figur 4 og Figur 5 er nyttige for førsteordens analyser, men er av begrenset gyldighet når man skal vurdere faktisk oppetid for spesifikke brytningssystemer offshore. Grunnen til dette er at ulike systemer vil ha ulike nødvendige værvinduer. Dette krever noe mer analyse enn de forenklete fremstillingene her. Lesage (2020) vurderte de samme dataene og simulerte nedetid for Nautilus Minerals sitt planlagte brytningssystem plassert i Norskehavet. Figur 6 viser nedetid for vertikaltransportløsningen til Nautilus Minerals med de gjeldende værforholdene. En ser at løsningen til Nautilus nærmest har 100% nedetid i februar, mars og desember og høye nedetider i januar, april, oktober og november, hvis man hadde brukt den foreslåtte vertikaltransportløsningen fra Nautilus Minerals for Solwara 1 innenfor utredningsområdet for å frakte malmen opp fra havbunnen til fartøyet. Dette understreker behovet for spesialtilpassede løsninger.



Figur 6 Gjennomsnittlig nedetid for vertikaltransportløsningen til Nautilus Minerals plassert nært punkt Mohns_5 i Figur 3; fra Fig 5 i artikkel 2 i Lesage (2020).

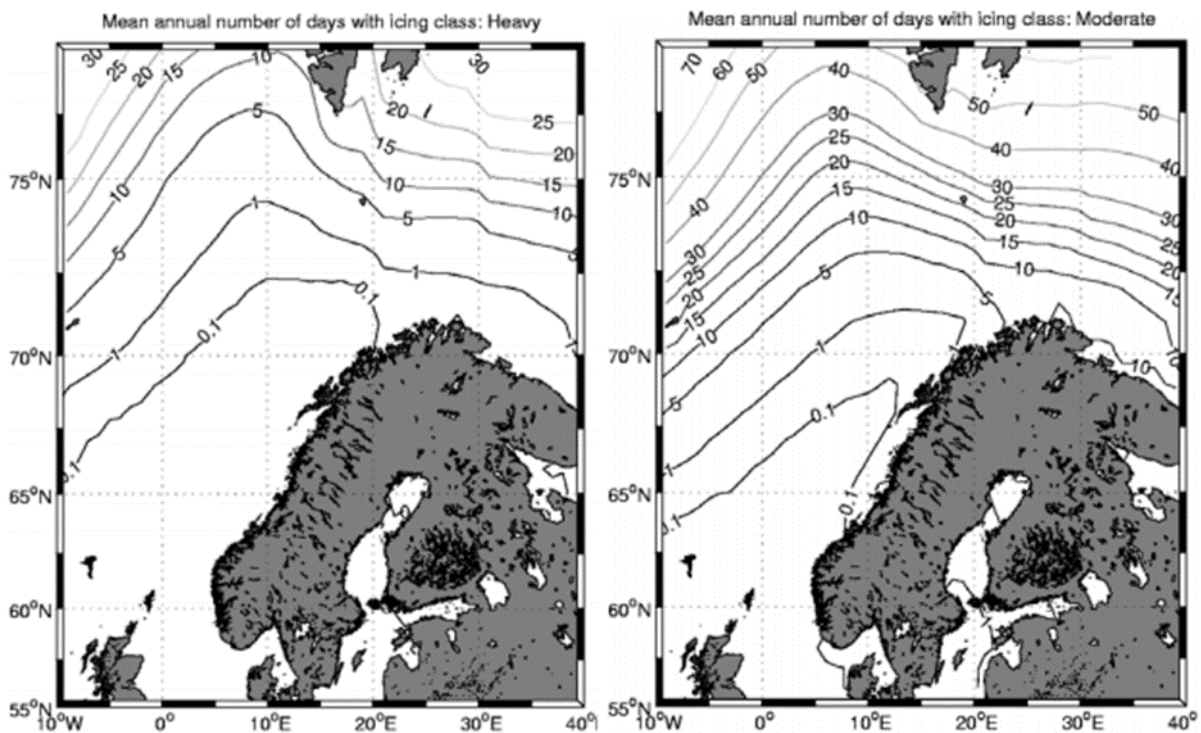
2.2.3 Marin ising, sjøis og isfjell

Deler av utredningsområdet ligger langt mot nord og har dermed noen utfordringer som må hensyntas i konseptvalg, operasjonsplanlegging og ved design av fartøy og utstyr. Disse klimatiske påvirkede faktorene vil selvsagt variere i omfang avhengig av hvilken del av området som studeres. Under gis en kort oversikt over disse faktorene, deres omfang i forskjellige områder samt hvilke utfordringer disse kan representere.

Marin ising

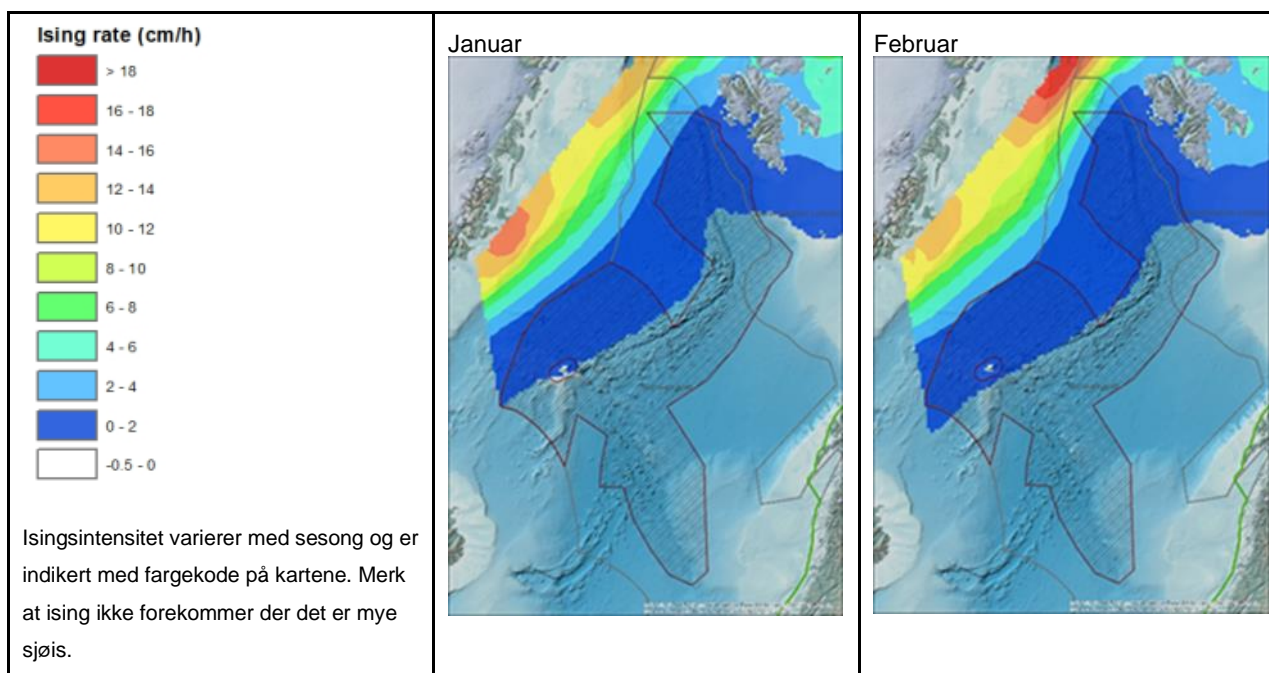
Marin ising forårsaket av sjøsprøyt som fryser på fartøy er en kjent problemstilling for fartøy som opererer i åpent farvann i kaldt klima og vanligvis det største isings-problemet til sjøs. Marin ising må påregnes særlig i de nordlige delene av utredningsområdet, men omfanget vil i stor grad avhenge av forekomsten av kuldegrader og værforhold. Forståelse av omfanget av ising og dens påvirkning på produksjonsstøttefartøy (stabilitet, lasteevne, bevegelige komponenter, HSE etc.) er forhold som må adresseres under design og operasjonell planlegging for å fremme sikkerhet og unngå unødig reduksjon i produktivitet.

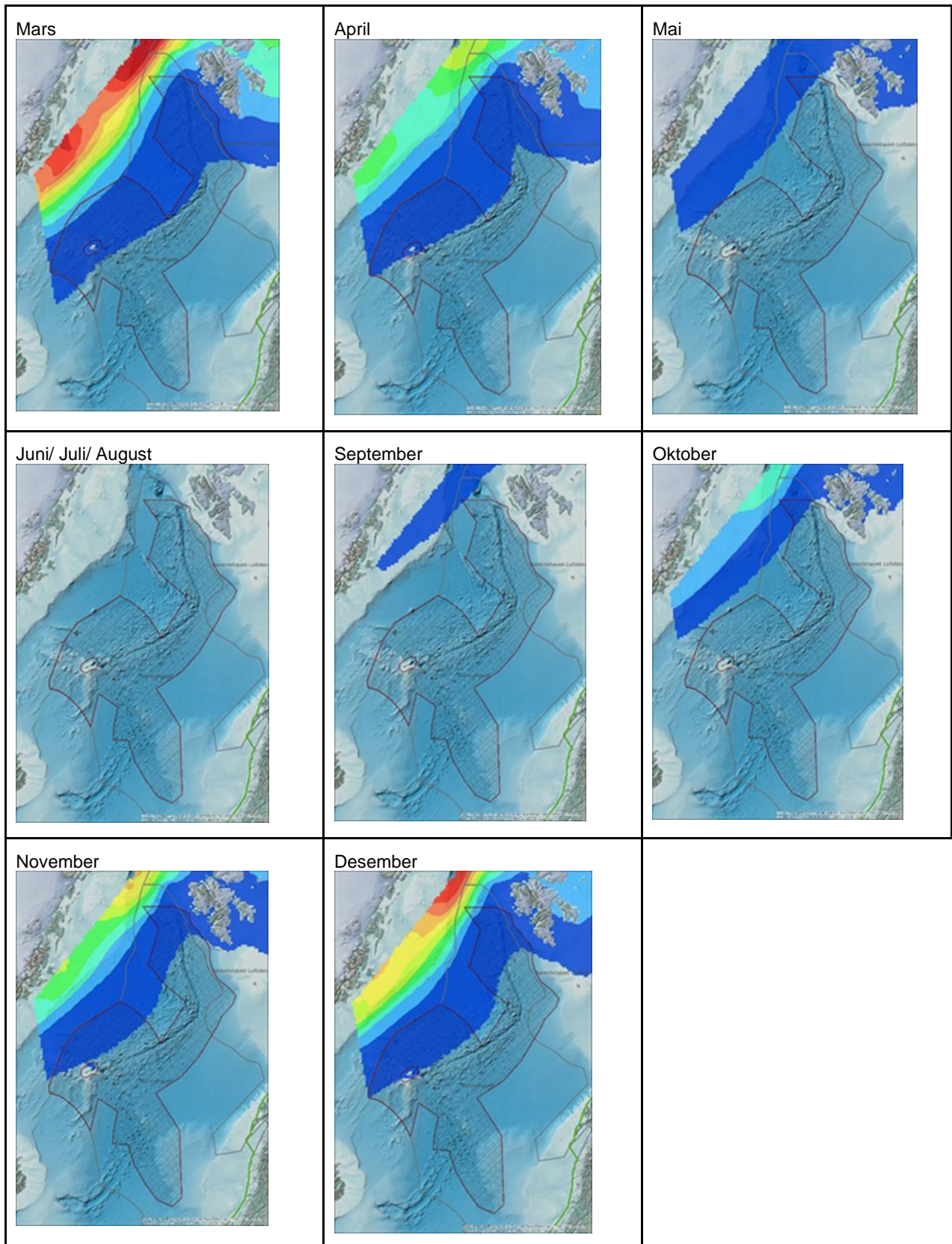
Figur 7 er hentet fra NORSOK 003, Annex A, og er ett eksempel på årlig gjennomsnitt antall dager med betydelig (2-4 cm/time) og moderat (0,7-2,0 cm/time) ising for ulike områder etablert med en forenklet isingsmodell. Generelt ser man at det er flere dager med potensiale for ising jo lenger nord du kommer.



Figur 7 Årlig gjennomsnitt antall dager med betydelig og moderat ising.

I tillegg til områdeavhengighet er det store sesongvariasjoner i forekomst av ising. Figur 8 viser gjennomsnittlig månedlig isingrate basert på data innhentet i perioden fra 2007 til 2016. Datagrunnlaget er NORA10 produsert av Meteorologisk Institutt og har en romlig oppløsning på 10km og tidsoppløsning på 3 timer. Utredningsområdet vises med skravering. Det er særlig områdene nordvest for Jan Mayen samt Knipovichryggen som er utsatt for marin ising i perioden november til april.

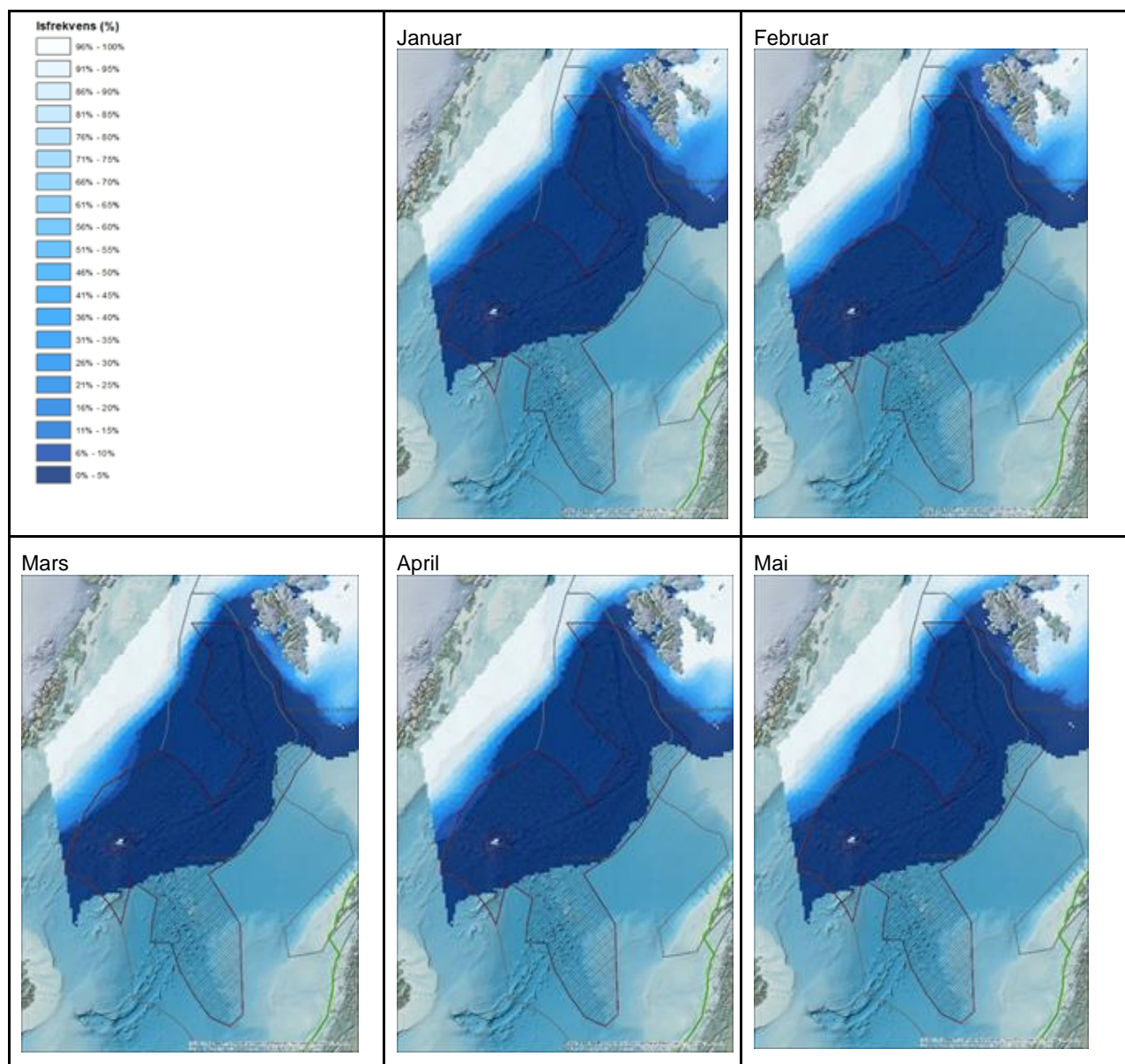


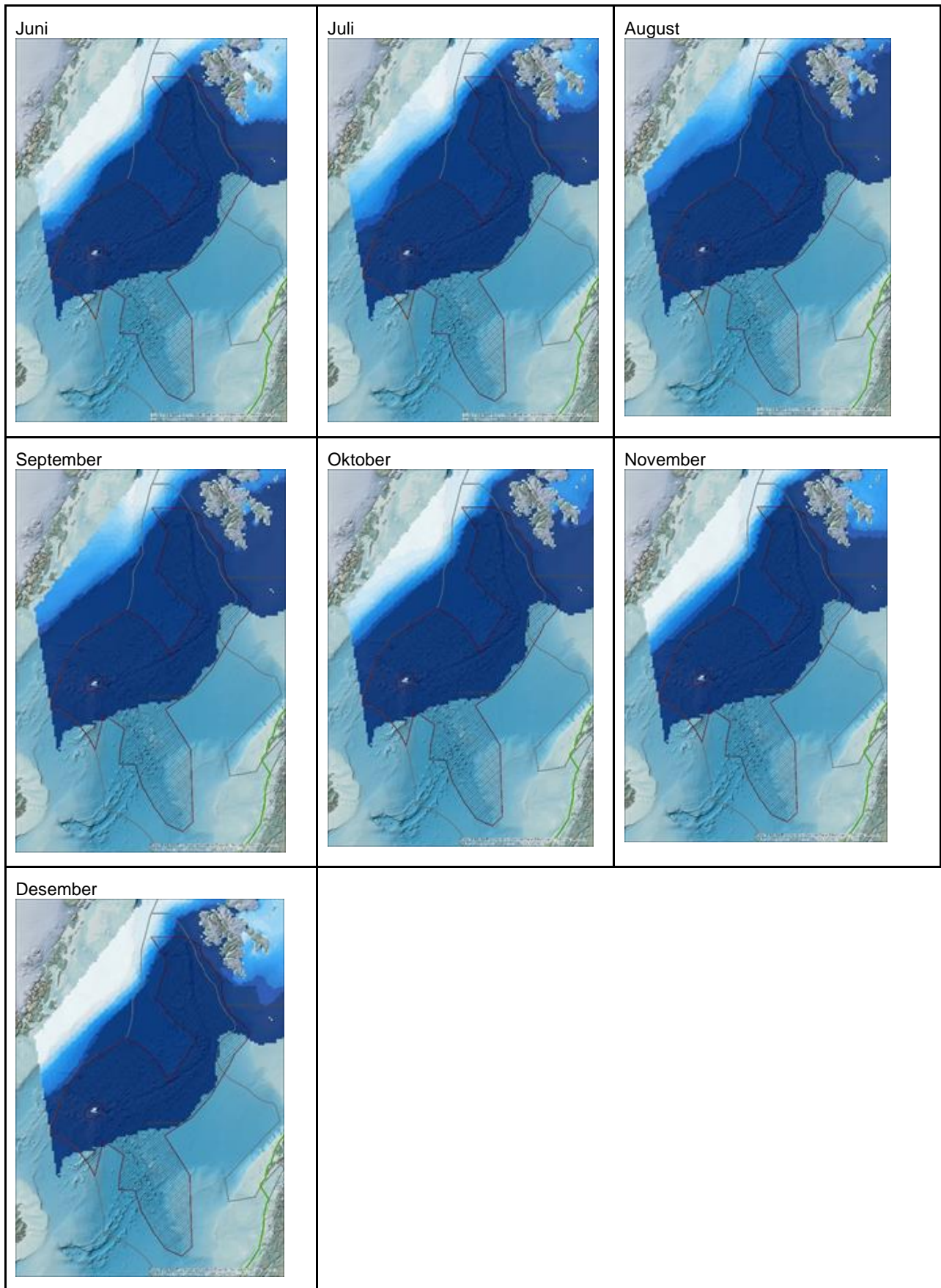


Figur 8 Månedlig gjennomsnitt ising rate (cm/time).

Sjøis

Sjøis må påregnes i deler av utredningsområdet, og dannes når overflatevann kjøles ned til ca. $-1,9^{\circ}\text{C}$. Sjøisens bevegelser (drift) påvirkes av vind, bølger og havstrømmer. Sjøisens interaksjon med produksjonsstøttefartøyet (skrog) vil variere avhengig av sjøisens karakteristikk, men i hovedsak representerer sjøis en utfordring for fartøyenes evne til å holde posisjon eller anlagt kurs. Sjøis karakteriseres av hvor stor del av havoverflaten det dekker (konsentrasjon) og vil variere i tykkelse og karakteristikk. Den deles gjerne i jevnis, som er flat udeformert sjøis og skrugarder som er større ansamlinger med oppbrukt sjøis som er frosset fast i hverandre og som kan utgjøre betydelig volum med is både under og over vann. Figur 9 viser gjennomsnittlig månedlig sjøisfrekvens basert på daglige data over en 10 års periode. Datagrunnlaget er fra National Snow and Ice Data Center (NSIDC) og viser frekvens av iskonsentrasjon over 15% i hver måned. Utredningsområdet vises med skravering. Som det vises på Figur 9 er sjøisfrekvens noe mindre påvirket av sesong, men store nordlige og østlige deler av utredningsområdet vil kunne påvirkes av dette, særlig i vinter / vår sesong. Sjøis er ikke ansett å være ett betydelig problem, men noe som må hensyntas avhengig av hvor i utredningsområdet en befinner seg og hvilken tid på året.

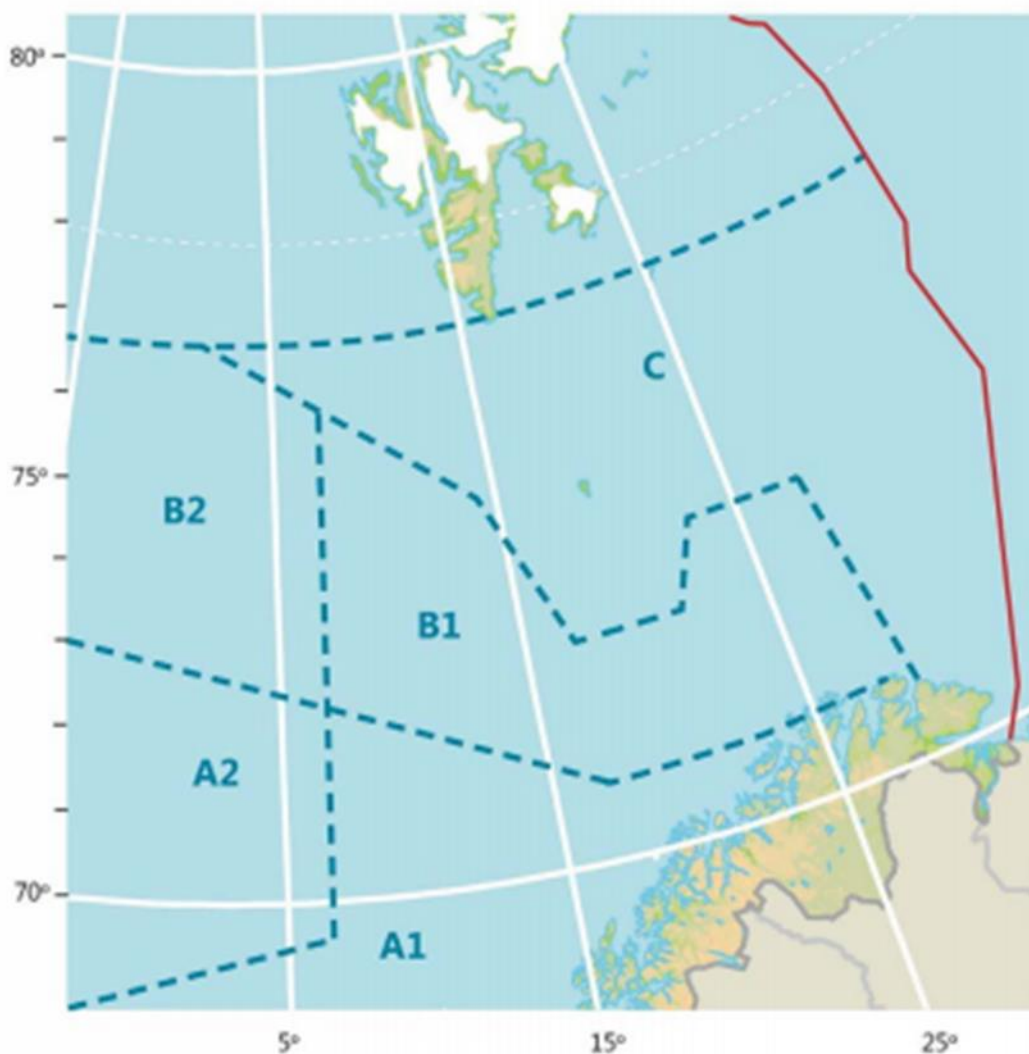




Figur 9 Månedlig sjøisfrekvens (%).

Isfjell

Tilstedeværelse av isfjell kan ikke neglisjeres i store deler av utredningsområdet. Det er ventet at det under design av produksjonsstøttefartøyer og vertikale transportsystemer må hensyntas risiko for kollisjon med isfjell inkludert en strategi for håndtering av situasjoner der slik kollisjon kan inntreffe. En slik strategi kan for eksempel innebære mulighet for å flytte produksjonsstøttefartøyet når det er risiko for kollisjon med isfjell. Det kan nevnes at for petroleumsrelatert industri krever NORSOK N-003 at ved en årlig sannsynlighet for kollisjon med isfjell over 10^{-4} , må virkning fra slik kollisjon tas hensyn til ved design av installasjoner. I NORSOK N-003, Annex A, vist i Figur 10, presenteres en forenklet områdeinndeling med angivelse for sannsynlighet for kollisjon mellom installasjon og isfjell.



Figur 10 Kart fra NORSOK N-003, Annex A, Forenklet områdeklassifisering

Tabell 2 Sannsynlighet for kollisjoner i forskjellige områder (NORSOK N-003)

Område	Sannsynlighet for kollisjon mellom installasjon og isfjell
A1	Ikke nevnt – antatt neglisjerbar
A2	Ikke nevnt – antatt neglisjerbar
B1	10^{-4}
B2	10^{-4}
C	10^{-2}

Områdene vest av Svalbard (Knipovichryggen) samt vest av område B2 og A2 er ikke dekket av NORSOK N-003's forenklete områdeklassifisering. Det er ventet at store deler av dette området har sannsynlighet høyere enn 10^{-4} for kollisjon mellom installasjon og isfjell. For de områdene nærmest Svalbard og lengst vest mot Grønland er det forventet at det er betydelig høyere sannsynlighet for kollisjon mellom installasjon og isfjell.

2.2.4 Geotekniske forhold

I Appendiks 1 gir Oljedirektoratet en uttalelse om erfaringer med sedimentfasthet på havbunnen i områder langs Mohnsryggen, hvor OD har vært på tokt. OD oppsummerer fastheten i tre kategorier: Hard havbunn, Bløt havbunn og Hard, men ustabil havbunn på de aktive sulfidforekomstene. Hard havbunn beskriver hovedsakelig havbunn uten sedimenter, men med fast fjellbunn som putelava, vulkanske breksjer og gabbro. Bløt havbunn beskriver lyse sedimenter, hovedsakelig leirfraksjon. Disse sedimentene er uansett relativt faste, da OD har gjort forsøk med å sette ned ROV og erfart at denne ikke synker dypere enn 10 cm og etterlater bratte kanter. OD rapporterer at de også har sett gamle slepespor i sedimentene. Dette bekreftes også av Ludvigsen et al. (2016) som observerte slepespor ved Mohnskatten. Disse stammer antakeligvis fra UiB sitt tokt i 2002 (Pedersen og Thorseth et al., 2010).

2.3 Teknologisk modenhetsnivå

Vurderingen av teknologisk modenhetsnivå (på engelsk «Technological Readiness Level», TRL) er sentralt i gjennomgangen av teknologier.

Teknologisk modenhetsnivå (TRL) er en metode som ble utviklet av NASA på 1970-tallet for å estimere modenheten til teknologier. I 2010 rådet EU-kommisjonen EU-finansierte forsknings- og innovasjonsprosjekter til å ta i bruk NASA-metoden, og TRLer ble derfor brukt i EU Horizon 2020-programmet. I 2013 ble TRL-skalaen ytterligere formalisert av ISO 16290:2013-standarden "Romsystemer - Definisjon av teknologiberedskapsnivåene (TRLer) og deres vurderingskriterier". TRL består av 9 nivåer der 1 er den laveste (grunnleggende prinsipper observert) og 9 den høyeste (faktisk system påvist i driftsmiljø). Figur 11 viser definisjonene som brukes i EU Horizon 2020-programmet som også brukes av Norges forskningsråd.

For teknologiene for utvinning av havbunnsmineraler vurderes TRL for hvert konsept. På grunn av de ulike forholdene i og utenfor utredningsområdet, er det kun mulig å gi en overordnet samlet vurdering for noen av konseptene.

TRL 9	faktisk system bevist i driftsmiljø (konkurransedyktig produksjon når det gjelder nøkkelaktiverende teknologier, eller i verdensrommet)	actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)
TRL 8	system komplett og kvalifisert	system complete and qualified
TRL 7	demonstrasjon av systemprototype i driftsmiljø	system prototype demonstration in operational environment
TRL 6	teknologi demonstrert i relevant miljø (industrielt relevant miljø når det gjelder nøkkelaktiverende teknologier)	technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
TRL 5	teknologi validert i relevant miljø (industrielt relevant miljø når det gjelder nøkkelaktiverende teknologier)	technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
TRL 4	teknologi validert i laboratorium	technology validated in lab
TRL 3	eksperimentelt bevis på konsept	experimental proof of concept
TRL 2	teknologikonseptet beskrevet	technology concept formulated
TRL 1	grunnleggende prinsipper observert	basic principles observed

Figur 11 Definisjon av de ni nivåene av teknologimodenhet (TRL). Kilde: fra Horizon 2020 - work programme 2014-2015, publisert i 2014.

3 FOREKOMST AV HAVBUNNSMINERALER

Det er prinsipiell forskjell på marine mineralforekomster og dypmarine mineralforekomster. Forskjellen er basert på hvor de forekommer i forhold til kontinentalsokkelen. Ifølge Ecorys-rapporten (Molemaker et al., 2014) er marine mineralforekomster, forekomster som finnes innenfor kontinentalskråningen, inne på de grunne delene av kontinentalsokkelen. Slike forekomster kan typisk være sand og grus til bruk som tilslagsmaterialer; såkalte placer forekomster (f.eks. gull, diamanter og tinn); fosforitter; og gasshydrater eller tungmineralsand med viktig innhold av en eller flere tunge mineraler som zirkon, ilmenitt, rutil, zircon, monazitt. De største produsentene av tungmineralsand finner vi i Australia, Kina, Sør-Afrika og Canada. Diamant er et annet mineral som finnes i marine mineralforekomster, som for eksempel utenfor kysten til Namibia (mining-technology.com, 2018), hvor norsk industri har vært involvert i utvikling av fartøy for drift (Framstad og Sundberg, 2017) på oppdrag fra De Beers. Marine mineralforekomster er ofte resultat av erosjon og forvitningsprosesser på land som etter hvert fører til avsetninger på kontinentalsokkelen der gunstige strømningsforhold har medført oppkonsentrering med en konsentrasjonsfaktor som gir økonomisk verdifulle forekomster av et gitt mineral eller metall.

Dypmarine mineralforekomster derimot, finnes stort sett utenfor kontinentalskråningen som resultat av prosesser som skjer på havbunnen og i havvannet. Forekomster av mineraler og metaller på dyphavet kan grupperes i tre hovedtyper; Massive sulfidforekomster på havbunnen (eng.: Seafloor Massive Sulphides, SMS); Polymetalliske mangannoduler (PMN) og Koboltri- eller polymetalliske manganskorper (CRC). De geologiske prosessene som danner sulfider og de som danner noduler og skorpe er fundamentalt forskjellige. Sulfidforekomster er vanligvis relatert til tektono-magmatiske sentre i havbunnskorpen, som for eksempel spredningsrygger. For Norges vedkommende er den Arktiske Midthavsryggen (AMOR) aktuell for sulfidforekomster. Dannelsen av sulfidforekomster er avhengig av tektonisk og magmatisk aktivitet som bidrar til sirkulasjon av hydrotermalt (varmt) vann i havbunnskorpen og senere avsetning av sulfidmineraler på eller i havbunnen. Noduler og skorpe derimot, er hovedsakelig relatert til utfelling av metaller fra sjøvannet som avsettes på en kime (nuklide). Eksempel på ulike kimer kan for eksempel være en haitann eller et sandkorn på havbunnen for noduler, eller overflaten på undersjøiske fjell, såkalte «seamounts», for skorpe. Noe av innholdet av metaller i havvannet som leder til dannelse av noduler og skorpe, kan også skyldes tilførsel av disse til havvannet gjennom bidrag fra hydrotermalt vann. Innenfor utredningsområdet finnes kjente forekomster av sulfider og skorpe, men det er per i dag ikke gjort funn av noduler. Man kan ikke utelukke at det kan bli gjort funn av denne type forekomster i området i framtiden.

Dypmarine mineralforekomster ble først oppdaget gjennom noduler på dyphavsslettene tilbake på 1800-tallet i forbindelse med *HMS Challenger* ekspedisjonen (se f.eks. Glasby, 2015). Omtrent samtidig ble også noduler funnet i Karahavet gjennom A. E. Nordenskjold ekspedisjonen (Vereshchagin et al., 2019). I løpet av 1970-årene la data fra havbunnskartlegging av vanntemperatur og varmestrømmer, og modellering av disse dataene, grunnlaget for ideen om at vandige hydrotermale væsker ble frigjort gjennom varme kilder på havbunnen (Corliss et al., 1979). Massive sulfidforekomster i form av hydrotermale (svarte) skorsteiner ble først oppdaget ved Galapagos-riften i 1977 (Corliss et al., 1979).

Ifølge Hein et al., (2013) har den økonomiske interessen for de ulike forekomstene ofte dreid seg om Ni–Cu–Mn for mangannoduler, Co–Ni–Mn for manganskorpe og Cu–Zn–Au–Ag for sulfidforekomster. De såkalte sjeldne jordartene (REE), står sammen med bl.a. kobolt på EU sin liste over Critical Raw Materials (European Commission, 2020), og kan finnes oppkonsentrert i skorpeforekomster, og kan derfor være mulige produkter fra disse. De følgende underkapitlene gir en kort innføring i de to hovedtypene av mineralforekomster som per i dag er funnet på havbunnen innenfor utredningsområdet. Det gis en kort redegjørelse for deres dannelse, viktigste egenskaper relatert til mineralutvinning, slik som mineral og elementinnhold, gjennomsnittsgehalter og tonnasje i kjente forekomster. Det gis også en oversikt over kjente forekomster sammen med en oversikt over de mest relevante, kjente forekomstene internasjonalt. Det gis også først en innføring knyttet til den arktiske midthavsryggen og dens betydning i dannelsen av mineralforekomster.

3.1 Midthavsrygger generelt

Verdenshavene er hjem til midthavsrygger (MOR) som strekker seg langs konstruktive plategrenser. De konstruktive plategrensene bidrar til havbunnsspredning og er årsaken til at to kontinenter glir fra hverandre, slik som for eksempel det Eurasiske og det Nordamerikanske kontinent. Disse plategrensene er ofte vulkansk aktive og vertskap for sulfidforekomster. Spredningshastigheten langs ulike spredningsrygger eller mellom ulike deler av samme spredningsrygg kan variere betydelig. Spredningsrygger strekker seg typisk fra nord til sør gjennom Atlanterhavet og er senter for dannelse av ny havbunnskorpe. Den Midt-Atlantiske Ryggen (MAR) utgjør spredningsaksen og i sør er det den Afrikanske platen og den Søramerikanske platen som glir fra hverandre. Den Eurasiske plate og den Nordamerikanske plate glir fra hverandre i den nordlige delen. Nord for Island kalles denne ryggen *Den arktiske midthavsryggen (AMOR)* og strekker seg nordover forbi Spitsbergen, til den Sibirske sokkelen i Laptevhavet. Deler av det 4000 km lange spredningssystemet i AMOR, ligger innenfor norsk jurisdiksjon og dermed utredningsområdet, og inkluderer to av totalt seks supersegmenter, Mohnsryggen (550 km lang) og Knipovichryggen (500 km lang), som er beskrevet i påfølgende underkapitler. De to segmentene er separert ved et markant skille i orienteringen av ryggen ved 74°N, (Pedersen, Thorseth et al. 2010). Spredningen langs AMOR varierer fra ortogonalt i forhold til spredningsryggens hovedorientering, til skrå ved Mohnsryggen og veldig skrå i Knipovichryggen (Pedersen, Thorseth et al., 2010).

3.1.1 Mohnsryggen

Den sørlige delen av Mohnsryggen er sterkt påvirket av *hotspoten* under Island og Jan Mayen. Påvirkningen fra vulkanske hotspots, medfører forhøyet topografi og økt vulkansk aktivitet på denne delen av Mohnsryggen (Pedersen, Thorseth et al 2010). Lenger nord blir riftdalen i spredningssonen mer tydelig. Der er havdypet i riftdalen opp mot 3500 meter på det dypeste mens dalsidene stedvis når opp til 1000 meters dyp. Spredningshastigheten på Mohnsryggen ligger på rundt 15 mm/år, og den skrå spredningen har en vinkel på 25-30° i forhold til ryggens hovedretning. Nede i riftdalen i Mohnsryggen ligger det med 30 – 50 kilometer mellomrom såkalte aksiale vulkankomplekser (eng: *axial volcanic ridges - AVR*).

3.1.2 Knipovichryggen

Oppbyggingen av Knipovichryggen er i stor grad lik den man finner på Mohnsryggen men med noen viktige unntak (Pedersen, Thorseth et al. 2010). Vinkelen på spredningen er mer skrå, opptil 60° i forhold til ryggens hovedretning. I tillegg er avstanden mellom AVR'ene lengre, typisk 100 km. Den effektive spredningshastigheten på Knipovichryggen ligger ned mot 10 mm/år i den sørlige delen av ryggen (Hellevang og Pedersen, 2005). Den lave effektive spredningsraten skyldes den veldig skrå orienteringen på spredningen langs ryggen.

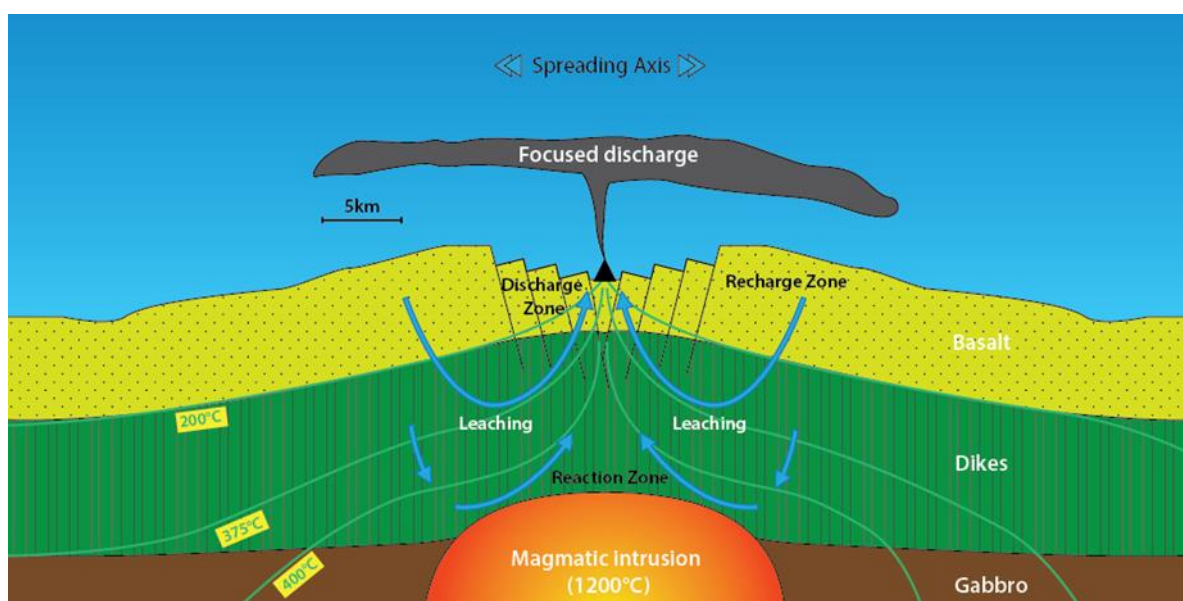
3.2 Massive sulfider på havbunnen

Forekomster av massive sulfider på havbunnen, består av metallholdige mineraler som er dannet i og på havbunnen som resultat av samspill mellom sjøvann og en varmekilde i havbunnskorpen, like under havbunnen, langs spredningsrygger og langs vulkanske øybuer. Varmekilden er magmatisk aktivitet. Sulfidforekomstene er sagt å være moderne analoger til landbaserte vulkanogene massive sulfid- (VMS) forekomster (f.eks. Hannington et al., 2005). I Norge har mineralutvinning av basemetaller på land historisk vært drevet på VMS-forekomster, for eksempel i Røros, Løkken, Joma og Skorovas.

Den første oppdagelsen av aktive hydrotermale skorsteiner ble gjort i Galapagosriften på slutten av 1970-tallet (Corliss et al., 1979), og ikke lenge etter, ble aktive hydrotermale skorsteiner funnet ved East Pacific Rise i 1979 (Macdonald et al., 1980). I norske farvann, ble de første oppdagelsene av aktive hydrotermale skorsteiner gjort av Universitetet i Bergen i år 2005, men allerede i 2000 ble det funnet sulfidfragmenter ved bruk av en bunnskraper (eng: dredge) over det som ble kalt Kobberhaugen (eng: Copper Hill). Tabell 3 gir en oversikt over forekomster langs Mohns- og Knipovichryggene innenfor utredningsområdet, i tillegg til funn sørover mot Island.

Sulfidforekomster i langsomme- og ultralangsomme spredningssentre som Mohns- og Knipovichryggen, er hovedsakelig knyttet til magmatisk- og tektonisk dominerte miljøer. De magmatiske miljøene er relatert til AVR (axial volcanic ridge)

strukturer og styrt av høye temperaturer fra nærliggende magma, rett under havbunnen. De tektoniske miljøene er knyttet til flankene på riftdalen hvor store forkastninger danner såkalte kjernekomplekser (eng: core complexes). Her er det dype gjennomtrengende forkastninger som kontrollerer den hydrotermale sirkulasjonen. Felles for alle sulfidforekomster er at hydrotermalt vann, havvann som har trengt ned i skorpen og vann fra omliggende bergarter, sirkulerer i skorpen og løser metaller fra bergartene de sirkulerer i. Figur 12 viser en prinsippskisse for dannelse av sulfidforekomster i langsomme spredningsentre (Ellefmo og Søreide 2019). Det hydrotermale vannet, som etter hvert mettes med metaller, kan til slutt nå mer enn 400 °C og kan ha lav pH. Dette vannet får positiv oppdrift og beveger seg opp gjennom forkastningssonene mot havbunnen, hvor de bidrar til dannelsen av sulfidforekomstene gjennom utfelling av sulfidmineraler i tilførselssystemet, i skorsteiner og som sky av utfelte mineraler i havvannet rundt skorsteineene. Mineralene i denne skyen sedimenterer raskt og danner et sulfidrikt sedimentlag som omslutter skorsteinsfeltet. Kollapsede skorsteiner vil med tiden bygge opp en «kolle» (eng. mound).



Figur 12 Skjematisert illustrasjon av systemet for dannelse av massive sulfidforekomster (SMS). (Ellefmo og Søreide, 2019)

Eksempler på kjernekomplekser assosiert med sulfidforekomster, er Ashadze, Logatchev og Semyenov. Disse er hydrotermale systemer på den Midt-Atlantiske ryggen (MAR). Tilsvarende er det eksempler på AVR-assosierte forekomster fra norsk del av AMOR, som f.eks. Ægirs kilde og Lokeslottet i nordlig del av Mohnsryggen.

3.2.1 Forekomster

Det er gjort en rekke funn av aktive hydrotermale systemer siden de første oppdagelsene i Stillehavet på 1970 tallet. De mest kjente mineralforekomstene finner vi i Bismarckhavet hvor Solwara-forekomstene ligger. Dette er forekomstene som var planlagt som de første til å bli drevet for økonomisk vinning. Firmaet Nautilus Minerals har tatt Solwara 1-forekomsten gjennom et *endelig lønnsomhets- / mulighetsstudie* og var i god gang med å definere og bygge brytningssystemet. Da økonomiske utfordringer til slutt satte en stopper for arbeidet til Nautilus, stod tre bunngående maskiner for utvinning av malm klare og hadde vært gjennom en våt test i Oman. Dette er nærmere beskrevet i teknologidelen (kapittel 5) sammen med en beskrivelse av produksjonsstøttefartøyet og systemet for vertikaltransport.

De største hydrotermale systemene finnes på langsomme spredningsrygger, der intens tektonisk aktivitet uten vulkanske utbrudd opptrer i lange perioder, kun avbrutt av kortere episoder med vulkansk aktivitet (Hannington et al., 2005).

Ifølge (Hannington et al., 2011) har det *internasjonale hav-boreprogrammet* (IODP) boret fire dype borhull i Bent Hill forekomsten og i ODP-kollen ved Middle Valley i Stillehavet (IODP tokt 139 og 169). Tilsvarende har IODP tokt 158

gjennomført boring i TAG kollen på den Midt-Atlantiske Ryggen med 17 borhull til et maksimalt dyp på 125 m under havbunnen. Det er i forbindelse med disse boringene beregnet omtrentlige forekomsttonnasjer i størrelsesorden fra 3-15 millioner tonn. Graber et al. (2020) estimerer at TAG-feltet inneholder ca. 29 millioner tonn mineralisert materiale. Dette er tall som er høyst usikre grunnet det begrensede datagrunnlaget.

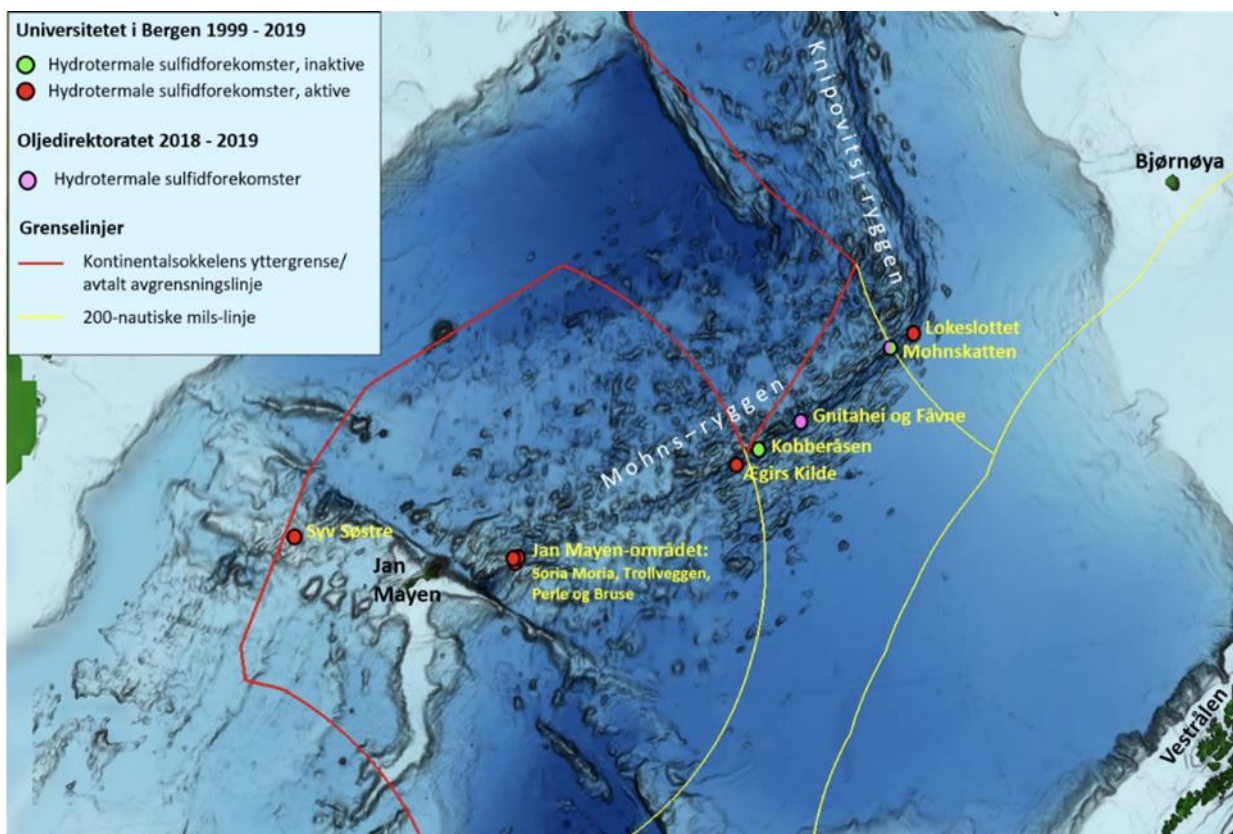
I Solwara 1 forekomsten har det blitt boret 293 kjerneborehull på til sammen 3253 meter (Lipton, 2012). Basert på bl.a. disse boringene, overflateprøver fra havbunnen, har Nautilus Minerals fått laget et ressursestimert for Solwara 1 2012 (Lipton, 2012) som sier at antatte og indikerte¹ ressurser er estimert til hhv 1,03 og 1,54 millioner tonn.

TAG forekomsten (Trans-Atlantic Geotraverse) har blitt besøkt og beskrevet av en rekke forskningstokt og forskere siden den ble oppdaget. Dette er sannsynligvis også det mest detaljert beskrevne hydrotermale systemet som ikke er undersøkt direkte for framtidig mineralproduksjon (Murton et al., 2019). Den har også blitt boret i ved flere anledninger, både som en del av IODP (Lag 158) i 1998 og senere av forskere fra bl.a. National Oceanography Centre (NOC) i Southampton gjennom EU prosjektet Blue Mining i 2016 (Murton et al., 2019). Ifølge Murton et al., (2019) er det i dag et aktivt system på TAG. Samtidig er det oppdaget minst 7 andre, inaktive, systemer.

Lenger sør i Atlanterhavet finner vi også Logatchev-, Ashadze-2- og Rainbowsystemene. I Stillehavet finner man kjente forekomster på Galapagosryggen og Juan de Fuca-ryggen. På den siste finner vi det hydrotermale systemet med Bent Hill og ODP kollen. Solwara-systemet i Bismarckhavet ligger innenfor den eksklusive økonomiske sonen til Papua Ny Guinea. Solwara består av en rekke sub-systemer som er definert som separate sulfidforekomster. Dette er aktive hydrotermale systemer i et øybuesystem. Solwara 1 er den første sulfidforekomsten som har vært planlagt satt i drift. Som det vil bli mer utførlig beskrevet senere i rapporten, har Nautilus Minerals planlagt drift på denne. Dette skal nå være utsatt på ubestemt tid. Utenfor Japan har Japanske forskningsmiljøer identifisert hydrotermale systemer på 1600m dyp i *Izena Hole* i *Okinawa Trough* (de Sá et al., 2021).

Langs AMOR er det gjort en rekke funn av aktive og inaktive hydrotermale systemer siden slutten av 1990 tallet, se Figur 13 og Tabell 3. Tabell 3 gir en oversikt over de kjente systemene på AMOR fra Island nordover til Svalbard.

¹ Mineralressurser og -reserver klassifiseres etter internasjonale koder, som for eksempel den Australasiske koden for rapportering av leteresultater, mineralressurser og malmreserver (JORC koden - <http://www.jorc.org/>).



Figur 13 Oversikt over utredningsområdet med identifiserte funn av sulfidforekomster markert langs den Arktiske midthavsryggen (AMOR). Kilde: Oljedirektoratet.

Tabell 3 Oversikt over identifisert hydrotermal aktivitet langs AMOR, fra Island nordover til nordlige Knipovich. Listen er basert på (Pedersen and Bjerkgård, 2016) og supplert med informasjon fra OD (for eksempel Oljedirektoratet, 2020-a). Systemer merket grønt er innenfor utredningsområdet. Mohnsskatten ble oppdaget ved sulfidfragmenter i bunnråll i 2002 under UiB tokt. I 2019 ble det hydrotermale feltet bekreftet av OD som inaktivt (Oljedirektoratet, 2020-a).

Navn	Status	Lokalitet	Oppdaget	Dyp (m)	Fluid temp (°C)	Malmtype
Grimsey Field	Aktiv	Grimseyryggen	1997	400	<250	n.a.
Kolbeinsey	Aktiv	Kolbeinseyryggen	n.a.	90	130	n.a.
Squid Forest	Inaktiv	Kolbeinseyryggen	1999	900	250-300	n.a.
Seven Sisters	Aktiv	Kolbeinseyryggen	2013	150	n.a.	n.a.
Soria Moria	Aktiv	Mohnsryggen	2005	700	<270	Zn>Pb;(Au;Ag)
Troll Wall	Aktiv	Mohnsryggen	2005	550	<270	Zn>Cu
Perle & Bruse	Aktiv	Mohnsryggen	2013	n.a.	<270	n.a.
Copper Hill	Inaktiv	Mohnsryggen	2000	900	330-370	Cu
Aegirs Kilde	Aktiv	Mohnsryggen	2015	2500	n.a.	n.a.
Mohnsskatten 1	Inaktiv	Mohnsryggen	2019	n.a.	n.a.	n.a.
Mohnsskatten 2	Inaktiv	Mohnsryggen	2019	n.a.	n.a.	"Sulfider"
Mohnsskatten 3	Inaktiv	Mohnsryggen	2019	n.a.	n.a.	n.a.
Lokeslottet	Aktiv	Mohnsryggen	2008	2400	>400	Cu>Zn;Au
Fåvne	Aktiv	Mohnsryggen	2018	3000	n.a.	Cu;Zn;(Co)
Gnitahei	Inaktiv	Mohnsryggen	2019	n.a.	n.a.	Cu;Zn;(Co)
Hydrotermal sky	n.a.	Knipovichryggen	2000	n.a.	n.a.	n.a.

3.2.2 Analoge forekomster på land

Som nevnt tidligere er historisk mineralutvinning i Norge basert på analoger til dagens sulfidforekomster på havbunnen. Disse analogene er kjent som vulkanogene massive sulfider (VMS) og eksempler på slike er Løkken, Røros, Joma og Skorovatn. Løkken er for eksempel beskrevet i Boyd et al. (2016).

Hannington et al. (1998) sammenlignet hele TAG komplekset inkludert kollen og den underliggende tilførselssonen med den analoge Troodosforekomsten på Kypros, som er typeeksempel for Kyprostype VMS forekomster. Troodosoffiolitten ser ut til å samstemme godt med det man ser ved TAG og arbeidet framhever viktigheten av det underliggende tilførselssystemet for forekomstens størrelse.

Sulfidforekomstene i Pilbara, i Western Australia, er eksempel som nevnes som blant de eldste malmforekomstene i den geologiske historien av f.eks. Hannington et al. (2005).

3.2.3 Mineralogi

Typisk mineralogi knyttet til massive sulfider på havbunnen er tidligere rapportert i mange ulike kilder, f.eks. Firstova et al. (2019); Snook et al. (2018). De viktigste økonomiske mineralene er Cu-, Zn-, Au- og Ag- førende mineraler og omfatter kobberkis (chalcopyritt), isokubanitt og sinkblende (sphaleritt). Gull forekommer som fritt gull (Au) men er også rapportert å opptre i form av elektrum (Au, Ag) og Calaveritt (AuTe₂) i Semyenov-2 hydrotermale felt (Firstova et al., 2019). Andre mulig økonomiske elementer kan være Pb, Co og mineraler av disse, for eksempel, blyglans for bly. Tabell 4 lister opp de viktigste mineralene knyttet til sulfidforekomster. Fra Lokeslottet på Mohnsryggen finnes flere vitenskapelige publikasjoner som viser til mineralogien i prøver tatt fra forekomsten, for eksempel (Snook et al., 2018). Her er det påvist kobberkis, isokubanitt og sinkblende som de viktigste økonomiske mineralene. Kobber finnes likevel i en rekke andre ulike kobbersulfider og kobber-jern-sulfider. I tillegg er det sett spor av blyglans og analyser viser at det skal være mindre mengder med gull. Her er det usikkert hvordan gull forekommer i bergarten da det så langt ikke er direkte observert i prøvene.

Tabell 4 De viktigste mineralene knyttet til sulfidforekomster inndelt etter malmmineraler (økonomisk verdifulle mineraler), mindre vanlige mineraler og gangmineraler (ikke økonomisk lønnsomme mineraler).

	Mineral	Formel
<i>Vanlige malmmineraler</i>	Kobberkis	CuFeS ₂
	Isokubanitt	CuFe ₂ S ₃
	Sinkblende	ZnS
	Blyglans	PbS
	Gull	Au
	Sølv	Ag
<i>Mindre vanlige mineraler</i>	Wurtzitt	(Zn,Fe)S
	Idaitt	Cu ₃ FeS ₄
	Chalcocitt	Cu ₂ S
	Covellitt	CuS
<i>Gangmineraler</i>	Svoelkis	FeS ₂
	Marcasitt	FeS ₂
	Magnetkis	Fe _(1-x) S
	Kvarts	SiO ₂
	Barytt	BaSO ₄
	Anhydritt	CaSO ₄
	Gips	CaSO ₄ *H ₂ O
	Talk	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂

Det har blitt publisert gehalter i sulfidforekomster som ligger godt på den høye siden i forhold til det man kjenner i tilsvarende, analoge, forekomster på land. De fleste analyserte sulfidprøvene som brukes til slike sammenligninger er ifølge for eksempel Hannington et al. (2011) og Snook et al. (2018) fra lett tilgjengelig overflatemateriale som stammer fra kollapsede skorsteiner og viser høy variabilitet. Det finnes begrenset mengde borekjerne fra dypmarine sulfidforekomster. Eksempler fra slike undersøkelser er rapportert fra Solwara prosjektet til Nautilus Minerals (Lipton, 2012) og Det internasjonale hav-boreprogrammet (IODP), hvor boring igjennom TAG ble gjennomført i (f.eks. Hannington et al., 1998 og Murton et al., 2019). Typisk for slike kjerneborekampanjer er at de støter på store utfordringer og høyt kjernetap². Sist ute med kjerneboring var Oljedirektoratet som boret med såkalt kveilerørsteknologi (eng: Coil Tubing) (Oljedirektoratet, 2020-a). Her er det ikke publisert endelige resultater, men det er uttalt at også her var det utfordringer med høyt kjernetap.

Gull er vanlig forekommende som sporelement i sulfidforekomster. Her vil det faktiske innholdet av gull være avgjørende for om det er økonomisk lønnsomt å forsøke å ta ut et konsentrat for gull alene, eller om det vil gå med et av konsentratene og utvinnes som en bonus fra dette. Ifølge Firstova et al. (2019) viser analyser fra TAG og andre systemer fra den Midt-atlantiske ryggen, at gull ofte er assosiert med sulfidmalmer i ulike miljøer, som ultramafiske systemer (Logatchev-, Ashadze-2- og Rainbowsystemene) og mafiske systemer (TAG). Ifølge Firstova et al. (2019) er det også indikasjoner på at høyere konsentrasjoner av gull finnes i ultramafiske systemer og at på MAR er det generelt høyere gull-innhold enn på East Pacific Rise.

Mineralogiske egenskaper som kan relateres til oppredningsegenskaper varierer stort. Mineralkornstørrelser varierer, men der de er rapportert, som for Lokeslottet, relativt små og i størrelsesorden mindre enn 10 mm (Snook et al., 2018). Dette medfører store utfordringer i videre bearbeiding av malmen og spesifikt i forbindelse med flotasjon. Det er også et kjent problem at sinkblende kan lide av såkalt *kobberkis-syke* hvor sinkblendens har ørsmå inneslutninger av kobberkis, noe som også er problematisk for flotasjon.

3.3 Polymetallisk koboltrik manganskorpe

3.3.1 Geologi og dannelse

Det er definert to hovedtyper av manganskorpe ifølge Glasby et al. (2015): Koboltrik manganskorpe, som er hydrogenetisk manganskorpe med mer enn 1 vekt-% Co, og hydrotermal manganskorpe som er den minst vanlige manganforekomstypen i verdenshavene. Det er hovedsakelig hydrogenetiske manganskorper som er de økonomisk interessante forekomstene. De hydrotermale manganskorpene utgjør mindre enn 1% av manganforekomstene i verdenshavene. Både hydrogenetisk- og hydrotermal manganskorpe forekommer som utfellinger på bergartsoverflater på undersjøiske fjell (eng: seamounts) hvor som helst i verdenshavene, der bunnforholdene er fordelaktige med redusert sedimentasjon og et fast substrat, dvs. underlag av fast fjell, fritt for sedimenter. Utfelling og avsetning av manganskorpe skjer på havdyp fra 400 til 4000 meter. Avsetningen er meget langsom og typisk avsetningshastighet er 1 til 5 mm per en million år (f.eks. Mizell and Hein, 2018). Manganskorper som vokser saktere har ofte høyere innhold av absorberte metaller. Tykkelsen på skorpen varierer i forhold til alderen siden avsetningen startet, typisk tykkelse for manganskorper er 5-10 cm. De tykkeste kjente manganskorpene er mer enn 26 cm tykke (Hein og Koschinsky, 2014). En viktig egenskap med manganskorpe er at de interne lagene er vekslende løse og faste, mens selve skorpen sitter godt fast til substratet (underliggende fjell) og kan derfor ikke enkelt plukkes fra overflaten (Hein og Koschinsky, 2014). Manganskorpene må derfor mekanisk frigjøres fra substratet og kan medføre at noe substrat følger med skorpen, avhengig av brytningsmetode. I en videre oppredning / prosessering av manganskorpe vil substratet typisk måtte skilles fra selve skorpematerialet ved en separasjonsprosess.

² Begrepet «kjernetap» brukes ved kjerneboring om situasjoner der man ikke får opp det komplette borkjerneintervallet. Et lite tap av kjernemateriale er vanlig. Noen ganger kan tapet bli stort og er typisk i områder med forkastningssoner og andre geologiske forhold hvor fjellet ikke er veldig kompetent. På engelsk brukes begrepet «core recovery» og beskriver den motsatte situasjonen, altså hvor stor andel av kjerneintervallet som faktisk utvinnes.

3.3.2 Forekomster

Det er uttalt at det finnes så mye som 33000 undersjøiske fjell i verdenshavene (Petersen et al., 2020). Et endelig tall er ikke definert. Bare de undersjøiske fjellene som befinner seg i havområder med forhold som ikke tillater sedimentasjon på bergartsoverflatene er fordelaktige for avsetning av koboltrike manganskorper. Dermed er det kun samme type bunnforhold som er prospektivt med tanke på denne type forekomster.

Ifølge Hein (2002) ble det i perioden 1981 til 2002 gjennomført 46 forskningstokt av ulike aktører fra ulike deler av verden. De fleste forskningstoktene var konsentrert om ulike EEZ-områder i Stillehavet.

Innenfor utredningsområdet er det Oljedirektoratet som har lett etter, gjort funn av og undersøkt forekomster av manganskorpe på havbunnen. Ifølge Oljedirektoratet (2020-b) er manganskorper påvist flere steder langs Vøringsutstikkeren og rundt Jan Mayen. De forekomstene av manganskorper som er funnet til nå på norsk sokkel kan deles i to grupper (Oljedirektoratet, 2020-b): 1) de som inneholder dobbelt så mye REE (sjeldne jordarter) som andre kjente forekomster ellers i Atlanterhavet og i Stillehavet; 2) de som har lavere konsentrasjoner. Ellers har ifølge Oljedirektoratet (2020-b) begge typer betydelig høyere innhold av litium (20-80 ganger) og scandium (4-7 ganger) enn andre kjente forekomster.

Japan har gjennomført et pilotforsøk for produksjon av kobolt og nikkel fra havbunnskorpe fra forekomsten Takuyo No.5 (Takuyo Daigo)³ innenfor Japans EEZ sør for Minamitorishima, ca 400 km øst for Tokyo. Denne forekomsten er beskrevet i flere vitenskapelige publikasjoner, blant annet i Nozaki et al., (2016) og Tanaka et al., (2020).

3.3.3 Mineralogi

Man kan anta at mineralogi og teksturer i skorpe er relativt lik den i noder, bortsett fra den konsentriske tekturen man ofte finner i noder. Manganskorper framstår lagdelte som følge av avsetning på hardt substrat. Lagdelingen oppstår som følge av endringer over tid i bl.a. sjøvannssammensetningen, veksthastighet og temperatur. Lagdelingen kan lett skilles visuelt og veksler mellom harde og tette lag og mer sprø og mer løst sammensatte lag. Mineralogien domineres av Mn-oksided vernaditt ($MnO_2 \cdot H_2O$) og røntgen-amorfe Fe-oksyhdroksider ($FeO(OH)$; feroxyhytt, ferrihydritt, og gøtitt). Manganskorpe kan inneholde mindre mengder kvarts, feltspat, fosformineraler og karbonater.

I *Mid-Pacific Mountains* (en region i Stillehavet) på 1100 til 1500 m dyp, er gjennomsnittlig metallinnhold i hydrogenetisk manganskorpe oppgitt til 28,4 vekt-% Mn, 14,3 vekt-% Fe, 1,18 vekt-% Co, 0,50 vekt-% Ni, 0,03 vekt-% Cu og 0,5 ppm Pt (Glasby et al., 2015). I Pacific Prime Crust Zone er tilsvarende verdier for Co, 0,66 vekt-% (Hein, et al., 2013).

Gjennomsnittlig forhold mellom Mn og Fe ligger rundt 2,0. Kobolt er for øyeblikket det metallet med størst økonomisk potensiale i manganskorpe. Videre er nikkel et metall med stort potensial. Som nevnt over har Oljedirektoratet uttalt at i utredningsområdet inneholder omtrent halvparten av forekomstene dobbelt så mye REE som den andre gruppen (Olje- og energidepartementet, 2021).

Ifølge Hein og Koschinsky (2014) er innholdet av interessante metaller i manganskorpe spesielt knyttet til Co, Ti, Mn, Fe, Ni, Pt, Zr, Nb, Te, Bi, Mo, W, Th og sjeldne jordarter (REEs). Petersen et al., (2016) poengterer at metaller som adsorberes i manganskorpe, inkluderer Co, Ni, Cu og Ti i tillegg til mindre mengder Mo, Te, Pt, Zr, Nb, Te, Pt, Zr, Nb, Bi og REE og løfter manganskorpe som en viktig ressurs for framtidig bruk i høyteknologiske produkter og grønn teknologi.

³ <https://oceanminingintel.com/news/industry/jogmec-harvesting-cobalt-and-nickel-from-the-sea-floor>

4 LETEAKTIVITET

Leting etter mineraler og metaller på landjorda har utviklet seg i århundrer fra tidlig middelalder, da man begynte å lete systematisk etter f.eks. edelmetaller og kobber. Utviklingen har gått fra mer tilfeldig søk på overflaten til å gradvis ta i bruk mer avansert utstyr. Dette avanserte utstyret inkluderer geofysikk fra fly / helikopter og fra bakkenivå. Her kan man også nevne fjernanalyse, som tar i bruk analyse av satellitt- eller data samlet inn fra fly eller droner av ulike typer for å lete etter egnet geologisk terreng. En kan også ta med kjerneboringer for å lete mot dypet. Utviklingen av malmgeologiske modeller har utviklet seg med funn av nye forekomster og økt kunnskap omkring hvordan disse er dannet og hvilke geologiske miljøer ulike forekomsttyper finnes i. De malmgeologiske modellene for Vulkanogene Massive Sulfid-forekomster (VMS) er til dels forstått i større grad etter at man oppdaget de hydrotermale skorsteinene på havbunnen samtidig som de tidlige modellene for VMS også bidro til å forvente at slike systemer faktisk eksisterer. Det avanserte utstyret som i dag brukes til mineralletting på land, kan ikke direkte overføres til bruk i leting etter massive sulfider og andre forekomster på havbunnen. En kan heller ikke direkte verifisere funn på samme måte som man kunne gjøre i tidlig fase av mineralletting på land, da funn ble gjort i dagen. Derfor er mineralletting på havbunnen en utfordring, all den tid en ikke enkelt og kostnadseffektivt kan bevege seg ned på de store havdypene. Det betyr at utstyr som detektorer og prøvetakingsverktøy må fraktes ned til havdypet, nært forekomsten, eller faktisk på forekomstene, ved hjelp av et eller annet fartøy (en plattform for transport og styring av utstyret). Eksempler på slike fartøy kan være autonome eller fjernstyrte undervannsfarkoster, såkalte AUV'er og ROV'er. Undervannsfartøyene må være sertifisert til forventet dyp for havområdene hvor leteaktiviteten foregår. Dette er typisk fra ca. 800m helt ned til 6000m havdyp i verdenshavene.

Leteaktivitet både globalt og nasjonalt, har søkelys på noder, og sulfider og skorpe har lavere prioritet. Samtidig er det ikke regnet som sannsynlig å finne noder innenfor utredningsområdet. Dette er også grunnen til at det meste av aktiviteter som refereres til i videre tekst er fokusert på sulfider og skorper. Likevel vil de regionale aktivitetene i stor grad kunne brukes uavhengig av forekomsttype.

4.1 Plattform for detektorer og verktøy

Siden leting etter marine mineraler skjer på store dyp fra noen hundre meter og ned til 4000-6000m havdyp i verdenshavene, er kravet til plattformer for detektorer og verktøy strengt. Valgte plattformer må oppfylle flere kriterier for å være anvendelige. De må være godkjent til det dyp hvor leteaktiviteten skal foregå; de må kunne opereres på avstand, enten fjernstyrtes eller programmeres (autonome fartøy); de bør kunne frakte flere sensorer på en gang og være egnet til innsamling av gitte data. Under gis en kort intro til tre hovedtyper plattformer for detektorer; produksjonsstøttefartøyer, autonome undervannsfartøyer og fjernstyrte undervannsfartøyer.

4.1.1 Overflatefartøy

Overflatefartøyer kan brukes til enkel kartlegging av havbunnstopografi og -strukturer, samt noe geofysiske data, fra overflaten. Følgende er eksempler på detektorer kan benyttes direkte:

- Multibeam batymetri
- Akustisk backscatter
- Side-scan sonar
- Geofysiske metoder som seismikk, elektromagnetisk eller magnetotellurisk
- CTD (Conductivity, Temperature, Depth)
- TV grabb
- Bunntrål

Overflatefartøyet er samtidig også utgangspunkt for kampanjer under havoverflaten som inkluderer de selvgående (autonome) eller fjernstyrte farkostene. I tillegg er overflatefartøyet utgangspunkt for de aller fleste boreoperasjoner som måtte bli anvendt (se senere kapittel).

En måte å lete etter aktive hydrotermale forekomster på er ved såkalt "plume hunting" eller jakt etter den svarte skyen fra hydrotermale skorsteiner. Denne type jakt gjøres ved hjelp av CTD og et skip med vinsj som kan heve og senke CTD instrumentet, som er utstyrt med tilpassede sensorer, ned gjennom vannkollonnen. Prøvetakingen gjøres da i et forhåndsbestemt mønster med gitt avstand mellom punktene i et rutenett. På denne måten kan man finne spor av hydrotermale skorsteiner i dataene fra CTD. Dette kan for eksempel være forhøyet temperatur eller metangassanomalier.

4.1.2 Autonome plattformer

Fullt autonome plattformer er såkalte autonome undervannsfarkoster (AUV). AUV'er er torpedoformede undervannsfartøy av ulik størrelse og ulik dybdeklassifisering. Størrelsen til AUV'en avgjør lastekapasitet. I tillegg vil batterikapasitet være en viktig faktor i bestykning og planlegging av undersøkelsesdykk.

Eksempel på ulike sensorer som kan inngå i oppsett av AUV er:

- Multibeam echosounder
- Sub-bottom profiler
- Syntetisk apertur Sonar (HiSAS) - Høyoppløselig havbunnsavbildning
- SideScan Sonar
- CTD (Conductivity, Temperature, Depth) for ledningsevne, temperatur og dyp samt andre vannkolonnekarakteristika som salinitet, trykk og tetthet.
- Geokjemisk sensor
- Selvpotensial / spontanpotensial (SP-sensor)

Ikke standard, men testede sensorer, inkluderer

- Magnetometer
- Undervanns hyperspektralt kamera
- HD kamera

Eksempler på AUV'er som brukes til mineralleting er: Hugin AUV - Norske Kongsberg Maritime har utviklet en AUV kalt Hugin. Denne er satt opp til å kunne bære ulike instrumenter og detektorer for ulike applikasjoner. Hugin har dybdegodkjenning til ulike dyp; 3000m, 4500m og 6000m. I 2021 lanserte også Kongsberg Maritime neste generasjons Hugin med økt rekkevidde, kalt Hugin Endurance⁴. Hugin Endurance har en oppgitt driftstid på opptil 15 dager som muliggjør lange ekspedisjoner på lange avstander fra moderskipet eller fra land.

Et annet eksempel er Sea Raptor - blant annet har norske Argeo nylig investert i Sea Raptor 6000 fra Teledyne Gavia⁵. Tanken er å bruke denne bl.a. i forbindelse med leting etter noder i Stillehavet.

Økt rekkevidde pga forbedret teknologi, som blant annet batterikapasitet, har bidratt til å gjøre denne type plattformer enda mer egnet for langvarige undersøkelser. Her har spesielt dybden ned til forekomstene vært en begrensning, da disse farkostene har brukt mye tid på ned- og oppstigningsprosessen. Dette er med nye teknologier, mindre kritisk.

⁴ <https://www.kongsberg.com/no/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/autonomous-underwater-vehicle-hugin-endurance/>

⁵ <https://www.offshore-energy.biz/argeo-secures-survey-work-orders-newbuild-auv/>

Ocean Floor Geophysics er et firma som har spesialisert seg på å operere AUVer med egenutviklede sensorer med tilhørende data prosessering. Blant de viktigste så langt er dette deres selvkompenenserende magnetometer og SP-sensor.

Ocean Infinity har utviklet og testet teknologi som bruker AUV-svermer som i samarbeid er tenkt å kartlegge havbunnen mer effektivt. Disse kommuniserer og gjennomfører undersøkelser i fellesskap.

4.1.3 Fjernstyrte plattformer

Fjernstyrte undervannsroboter (eng: Remotely Operated Vehicle, ROV) er viktige verktøy i lokal letevirksomhet og ressurskartlegging på havbunnen. ROVer er typisk forbundet med overflatefartøyet ved hjelp av en kontrollkabel (eng.: umbilical) som forsyner enheten med kraft (elektrisitet) og i tillegg transporterer data toveis. En ROV opereres typisk av en pilot ombord i overflatefartøyet som styrer via videostrøm på skjerm. ROV manøvrerer ved hjelp av thrustere og kan operere ned til havbunnen og kan også være utstyrt for å kunne plasseres på havbunnen. Dette kan medføre noe oppvirvling fra sedimentene på havbunnen.

Nede på havbunnen brukes ulike metoder for å ta fysiske prøver av geologisk og biologisk materiale, samt vannprøver. Det brukes også ulike sensorer for datainnsamling, for eksempel:

- ROV montert gripeklo til innsamling av steinprøver
- Innsamling av sedimentprøver med små kjernetakingsbeholdere
- Små kjerneboringsprøver av fjell og sedimenter
- Håndstykker skåret løs med motorsagliknende verktøy
- Fluidprøver
- Høyoppløste bilder til f.eks. fotogrammetri
- Hyperspektrale bilder
- Video- og fotoprofiler

4.2 Regional leteaktivitet

Leting etter mineraler og malmer på fastlandet utføres i flere steg. Forenklet kan dette arbeidet deles inn som følger: 1) det starter typisk som en skrivebordstudie hvor foretrukne områder defineres for ønsket mineraliseringstype. Disse områdene defineres på basis av etablerte malmforekomstmodeller og relateres til relevante geologiske miljøer. Her inngår data fra regionale geologiske kart og gjerne i kombinasjon med regional geofysikk. Regionale geofysiske data samles gjerne inn ved hjelp av fly- eller helikopterbårne sensorer. 2) når et foretrukket område er definert begynner feltarbeidet hvor kartlegging og prøvetaking gjøres i vannsystemer (sedimenter), jordsmonn (typisk C-horisonen) og bergarter, for å spore- og avgrense området hvor en mulig forekomst kan være lokalisert. 3) etter et positivt funn, begynner arbeidet med å avgrense og definere forekomstens utbredelse, dvs. ressursestimeringen, kontinuitet og metallinnhold (gehalt). Dette gjøres ved hjelp av prøvetaking av utgående (blotning) på overflaten, ved røsking (avdekning av fjell ved fjerning av løsmasser) og ved kjerneboring. Der mineraliseringen ikke har utgående (malmen er ikke tilgjengelig på overflaten), er det kun kjerneboring og geofysiske metoder som kan brukes til å evaluere forekomstens utbredelse, kontinuitet og gehalt.

For forekomster på havbunnen vil prosessen være liknende, men på grunn av tilgjengeligheten vil de ulike stegene selvfølgelig se noe annerledes ut. De påfølgende avsnittene vil skissere de ulike stegene man per i dag ser for seg at vil bli brukt i letefasen, presentert i kronologisk rekkefølge.

4.2.1 Eksempel på letestrategier for å finne sulfidforekomster

Universitetet i Bergen (UiB) startet letingen etter hydrotermale, sulfidførende kilder på norsk sokkel, med årlige vitenskapelige tokt allerede i 1999. Til å begynne med foregikk letingen ved å søke etter termale anomalier («hot plumes») i vannsøylen ved hjelp av regional analyse av batymetridata kombinert med vannkolonne data (CTD, pH og ORP), bunntråll, og bekreftelse med ROV-dykk. Dette ledet blant annet til funn av Lokeslottet i 2008 (Pedersen, Rapp, et al., 2010). Denne strategien, «plume hunting», for leting etter ukjente hydrotermale felt blir også bekreftet av andre forskere, f.eks. (German et al., 2008) og (Kowalczyk and Lum, 2017). UiB har benyttet geofysiske metoder og data i letingen etter aktive og inaktive sulfidforekomster. Dette gjelder særlig høyoppløselig multistråle-batymetri, sidesøkende sonar (HI SAS), og bunnpenetrerende ekkolodd (SBP). I det siste tiåret har UiB benyttet AUV for å samle inn slike data. UiB har gjennom jevnlig tokt lett etter, og stått for de fleste funnene av hydrotermale forekomster på norsk sokkel.

Oljedirektoratet har hatt vellykkede tokt i 2018, 2019, 2020 og 2021, der AUV / ROV er benyttet. Det er brukt ulike sensorer for å finne anomalier, som ble undersøkt visuelt med ROV. Særlig har bruk av spontanpotensial (SP) i forskningssamarbeid med UiB gitt gode resultater og ført til funn av forekomstene Fåvne (2018) og Gnitahai (2019).

I forbindelse med MarMine toktet (Ludvigsen et al., 2016) ble det gjennomført en letekampanje basert på regional analyse av batymetri som beskrevet i Ellefmo og Søreide (2019). Foretrukne områder ble deretter undersøkt ved hjelp av AUV med høyoppløselig batymetri, CTD og selvkompenenserende magnetometri (SCM). Disse dataene fra AUV-undersøkelsene ga anomalier knyttet til strukturer på havbunnen, CTD og magnetisme. Disse ble besøkt med ROV for å bekrefte anomaliene, uten funn i løpet av MarMine toktet. Etter mer utførlig prosessering av SC-mag data i etterkant av toktet (Lim et al. 2019) kunne disse dataene brukes i et av OD sine undersøkelsestokt, og eksakt lokasjon av den inaktive Mohnsskatten (omtrentlige koordinater første gang presentert av Universitetet i Bergen) ble bekreftet.

4.2.2 Regional letemetodikk

I petroleumleting er bruk av seismiske metoder den mest vanlige metoden for regional letevirksomhet som også brukes effektivt ned til avgrensning av forekomster. Kjerneboring brukes til å forstå geologi og definere riktige stratigrafier for kilde og reservoar. Brønnboring brukes til å bekrefte og størrelsesbestemme ressursen.

I jakten på mineraler på havbunnen vil bergartsegenskapene i stor grad ikke tillate bruk av seismikk skutt fra havoverflaten i regional leteaktivitet, da slike seismiske bølger per i dag, antakelig ikke vil være i stand til å avbilde sulfidforekomster i tilstrekkelig oppløsning. Her er pågående forskning innenfor området. I stedet vil metoder for innsamling av batymetri (havbunnstopografi) i ulik oppløsning være et av de første skrittene mot å finne en forekomst. Sulfidforekomster vil kunne lokaliseres ved hjelp av regionale og lokale morfologiske og geologiske strukturer. Havbunnseismikk (høyoppløselig) har blitt benyttet med suksess av Murton et al. (2019).

Johansen et al. (2019) benyttet magnetotelluriske (MT) målinger til å avbilde strukturer over AMOR ned til 120 km dyp og CSEM (Control Source EM) til mer høyoppløselige data av de grunnere delene av skorpen. MT er en metodikk som kan bidra til økt forståelse av de store prosessene knyttet til havbunnsspredning og hvordan dette bl.a. påvirker dannelsen av hydrotermale systemer. I økonomisk sammenheng, kan dette ifølge Johansen et al. (2019) benyttes i malmforekomstmodellering og senere bidra til å finne nye forekomster basert på økt kunnskap om disse systemene.

4.3 Lokal leteaktivitet

Når en forekomst er identifisert og bekreftet vil den lokale leteaktiviteten starte. Lokal leteaktivitet vil ha til hensikt å gå videre fra fysisk å bekrefte at en mineralisering eksisterer på lokaliteten til å gradvis bygge opp kunnskap om størrelse (avgrensning og kontinuitet) og metallinnhold (mineralogi, gehalter).

Metodikk som inngår i lokal leteaktivitet, inkluderer:

- Høyoppløselig batymetri (AUV) ved hjelp av multibeam. Dette gjøres for å få best mulig oppløsning på havbunnstopografien i området hvor forekomsten er lokalisert. Høyoppløselig batymetri vil i mange tilfeller bidra til

forståelse av videre plan for aktivitetene som skal gjennomføres. En første avgrensning av forekomsten kan ofte gjøres ut fra detaljert batymetri

- Prøvetaking av stein på havbunnen for analyse av metallinnhold. Dette gjøres typisk fra ROV og man tar prøver av interessant steinmateriale observert på havbunnen som kan plukkes med ROV manipulator. For manganskorpe kan man gjerne benytte motorsag som festes på ROV manipulator og kapper større biter fra en manganskorpe.
- Prøvetaking av den hydrotermale væsken fra skorsteiner. Dette kan bidra til å si noe om egenskapene til det hydrotermale løsnings i systemet og dermed også om potensialet for mineraliseringer i forekomsten. Her er temperatur og kjemisk sammensetning viktige brikker.
- For geografisk avgrensning av forekomsten benyttes metoder som kan bidra til å si noe om utbredelse horisontalt og vertikalt. Her er kjerneboring en metode som er avgjørende for bestemmelse av ressursen. I tillegg vil ulike magnetiske- og elektromagnetiske metoder, som Transient Electro Magnetics (TEM) og Controlled Source Electromagnetics (CSEM) kunne anvendes til dette. Automatisk kompensasjon av magnetiske data har også vist gode resultater, som beskrevet over. SP data har også bidratt til funn av tidligere ukjente SMS forekomster.

4.4 Utstyr for boring og prøvetaking på havbunnen

4.4.1 Norske initiativ

Det har i de siste årene vært fokus fra myndigheter og forskningsmiljøer på potensialet for ny norsk industri knyttet til dypmarin mineralutvinning. Dette feltet har også vært lansert som en stor mulighet for omstilling av oljeindustrien. Som følge av dette har det blitt etablert flere norske selskaper som satser på dypmarin mineralutvinning som en framtidig aktivitet. I kapittel 5.2 er det gitt en oversikt over disse selskapene og deres aktiviteter mot dypmarin mineralutvinning. Eksempler på dette er nevnt nedenfor. Utfyllende detaljer gis i senere kapitler.

ScanDrill Deepwater Drill rig (Figur 42) er et av systemene som er utviklet av Scanmudring. Dette er tenkt å kunne bidra i letefasen med kjerneboring og kaksboring for innsamling av prøvemateriale. Det oppgis mulighet for inntil 3 meter lange kjerner.

Adepth Minerals og Seabed Solutions har med utgangspunkt i landbaserte system for kjerneboring, utviklet et system som kan fungere på dypmarine mineraler. Systemet skal kunne bore et titalls meter kjerne i områder med topografiske utfordringer. Systemet kalles Flexicore (Figur 40).

RenOcean har utviklet en teknologi som baserer seg på en plattform i form av en beltegående farkost som kan styres med verktøy av ulike typer og størrelser (Figur 37). For leteaktiviteten, er det i hovedsak boreteknologi.

Videre finnes en rekke selskaper i Norge som leverer utstyr relevante til utvinning av havbunnsmineraler, som det er gitt en oversikt over i kapittel 6.2.

4.4.2 Andre initiativ

Magnetiske målinger har vist seg å være av stor verdi i leting etter sulfidforekomster. Ikke minst som en viktig del av en letestrategi (Kowalczyk et al., 2015). Ocean Floor Geophysics har bygd et system for innsamling av automatisk kompensert magnetometri (eng: Self-compensating (SC) magnetometry) tilpasset bruk på enhver tilgjengelig AUV eller ROV (Kowalczyk and Lum, 2017). Noe som forenkler og forbedrer innsamling og prosessering av magnetometri data (Kowalczyk and Lum, 2017).

Det er verdt å nevne to utstyr som er lansert av Nautilus Minerals, basert på deres erfaringer fra ressurskarakterisering på Solwara 1 og Solwara 2 forekomstene. Basert på deres erfaringer med kjerneboring, har de utviklet en «Scout Drill» rigg, også kalt «Hobbiten», se Figur 14. Denne er designet for å kunne opereres fra rimelige fartøy og kunne plasseres på havbunnen i utfordrende terreng (Parianos and Manocchio, 2018). Den har en kapasitet på opptil 18 m kjerne. I

denne kjerneboringsteknologien de har bidratt til å utvikle, har Nautilus Minerals lagt ned en innsats for å redusere kjernetapet ved boring i sulfider på havbunnen.



Figur 14 Nautilus Minerals sin Scout Drill. Figur gjengitt med tillatelse fra Nautilus Minerals.

Nautilus har også utviklet en såkalt “autosampler” (Parianos and Manocchio, 2018) som ikke behøver en separat vinsj til utsetting / innsamling, se Figur 15. På grunn av de åtte prøveinnsamlingsrørene, har denne fått navnet *Jumping Spider*. Når autosampleren når bunnen, vil sedimentinnsamling starte med en utløsermekanisme som slår inn når enheten lander på bunnen. En tidsinnstilt enhet utløser «offerballast» når innsamling er ferdig og autosampleren stiger så til havoverflaten hvor et beacon, i kombinasjon med lys, benyttes for lokalisering og innsamling. Autosampleren kan enkelt håndteres fra små fartøy, som f.eks. fiskebåter, og den enkle håndteringen tillater utsetting av flere enheter om gangen.



Figur 15 Nautilus Minerals autosampler, Jumping Spider. Figur gjengitt med tillatelse fra Nautilus Minerals.

4.5 Oversikt over leteaktiviteter i utredningsområdet

Mineralleting i utredningsområdet har pågått siden tidlig på 2000-tallet. Aktivitetene startet med Universitetet i Bergen i 1998, og som senere har gjennomført mange forskningstokt gjennom Senter for geobiologi. Dette har ført til oppdagelsen av en rekke hydrotermale systemer, se Tabell 3. OD har deltatt på flere av disse toktene, men i de senere år, fra 2018 og senere, har OD vært på egne letetokt som har ført til nye funn av interessante forekomster. OD har tidvis også samarbeidet med Universitetet i Bergen og Universitetet i Tromsø om tokt. OD har til sammen samlet inn nærmere 100 skorpeprøver siden 2010 (Olje- og energidepartementet, 2021).

NTNU hadde i 2016 et tokt til Mohnsryggen og tok prøver av Lokeslottet og i det området som ble kalt Mohnsskatten, uten at det da var gjort funn av aktive eller inaktive systemer. Aktivitetene i MarMine toktet var rettet mot innsamling av prøvematerialer og data for å vurdere utvinningsteknologier for sulfider på havbunnen.

Utenlandske tokt i utredningsområdet er registrert i Fiskeridirektoratets database for utenlandske forskningstokt⁶. Ved søk i denne databasen, som strekker seg tilbake til 2013, er det et tokt som har vært knyttet direkte til forskning på dypmarine mineralforekomster i perioden. Dette er et tokt som ble arrangert i 2019 av Geomar (Hölz et al., 2019) på forskningsskipet Poseidon – og fokuserte på testing av geofysiske målinger med elektromagnetisk (EM) utstyr (MARTEMIS) på Lokeslottet og Grimsefeltet. Det ble også gjennomført relevante geologiske undersøkelser.

4.6 Spesifikke metoder egnet for manganskorpe

Ifølge Hein og Koschinsky (2013), har manganskorpe en betydelig høyere gammastråling enn det som er vanlig fra bergartene i substratet. Dette er en av veldig få kontraster i fysiske egenskaper mellom substrat og manganskorpen. Gammastrålingen kan derfor utnyttes til å oppdage- og skille manganskorpe fra “ordinære” bergarter. Dette kan skje selv når manganskorpen (ev. bergartsoverflaten) er dekket av tynne sedimentlag. Dette kan gjøres via geofysikk med radiometriske sensorer i geofysiske målinger. Multispektral seismikk kan også være en lovende teknikk for kartlegging av manganskorpe.

⁶ <https://www.fiskeridir.no/English/Coastal-management/Marine-scientific-research>

5 UTVINNING AV HAVBUNNSMINERALER

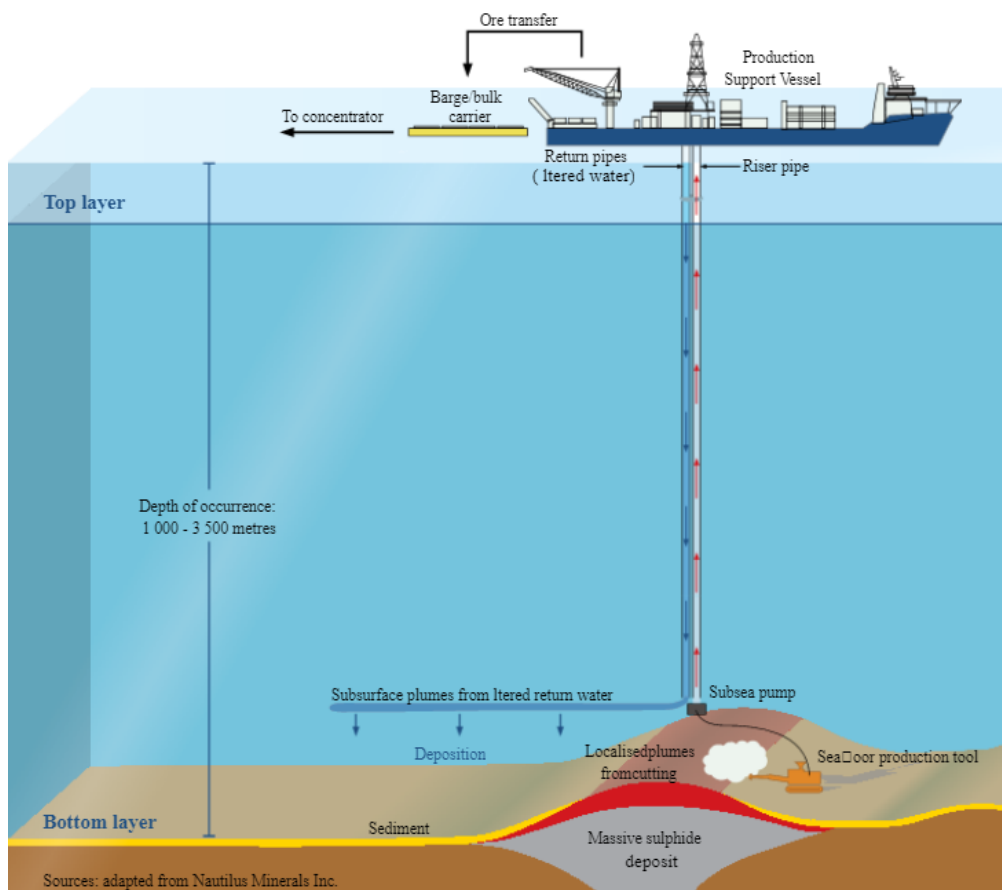
Dette kapitlet beskriver gjeldende kunnskap om teknologier innen utvinning av havbunnsmineraler og relaterte teknologier fra landbasert gruvedrift og marine applikasjoner, teknologimodenhetsnivået (TRL) og kunnskapsmangler. Videre inneholder kapitlet ekspertuttalelser om relevansen og anvendeligheten av forskjellige teknologier og metoder for utredningsområdet.

Kapitlet har forsøkt å dekke så mange tilgjengelige og mulige teknologier for utvinning av havbunnsmineraler som mulig. Så langt det har vært mulig så har lignende teknologier blitt gruppert sammen for å gjøre rapporten mer lesbar.

5.1 Utvinning av havbunnsmineraler

5.1.1 Oversikt over teknologier for utvinning av havbunnsmineraler

Metoder for utvinning av sulfidforekomster og manganskorpe kan man grovt sett dele inn i vertikale og horisontale utvinningsmetoder som bruker skjære- og sugeteknologier til å løsne / fragmentere materialet / «malmen» fra havbunnen, samle og transportere materialet til et konteinerbasert mellomlager (eng: buffer bin) på havbunnen, eller direkte til systemet for vertikaltransport (se Figur 16). Kombinasjonen av skjære- og sugeteknologier blir per nå vurdert som de beste fra et teknologisk og økonomisk perspektiv.



Figur 16 Illustrasjon av utvinning av sulfidforekomster hvor materialet transporteres direkte til et system for vertikaltransport til produksjonsfartøyet. Kilde: Secretariat of the Pacific Community (2013).

Vertikal utvinning

I vertikal mineralutvinning bryter man nedover til et forhåndsdefinert dyp før hullet utvides eller det lages nye hull eller grøfter. Forekomsten utvinnes med grøftkuttere (trenchers), borestrenger med stor diameter eller annet utstyr som styres og flyttes med eller uten hjelp av faste (men flyttbare) eller selvgående havbunnskonstruksjoner. Alternativt kan skjæreverktøyet (med en diameter mindre enn hullet) flyttes over og frese et avgrenset område på skjæreflaten, og dermed kontinuerlig gjøre hullet større. Det fragmenterte materialet samles mekanisk og / eller ved sug og transporteres vekk ved pumping (se kapittel 5.1.3 «Foreslåtte konsepter for vertikal utvinning»). Resterende deler og materiale som har falt inn i gropen kan fjernes, knuses og samles sammen med hovedverktøyet eller ved hjelp av spesialverktøy. Se avsnitt «Spesialverktøy og -metoder».

Horisontal utvinning

I horisontal utvinning bryter man overveiende horisontalt i skiver. Malmen, sideberget og sedimentene ⁷ fjernes vanligvis lagvis i en ovenfra og ned sekvens. De fleste av de kjente horisontale konseptene benytter ett eller flere beltegående utstyr utstyrt med en hydraulisk bom for å justere et skjære- og -suge- eller innsamlingsutstyr til stoffen (flaten det brytes på). Ulike typer maskiner kan brukes til selve mineralutvinningen og til forberedende arbeid. Hvis det er mulig, kan malmen utvinnes i skiver i en operasjon sammenlignbar med dagbruddsdrift på land.

Spesialverktøy og -metoder

Som et alternativ til rene enten vertikale- eller horisontale brytningsmetoder, kunne man potensielt ha brukt spesialverktøy og -metoder som er knyttet til saging, elektrisk- og mekanisk oppbrekking (ripping) eller hydraulisk brytning. Disse anses per nå enten som ikke relevante av tekniske og økonomiske årsaker eller har utelukkende spesielle anvendelser i støtteprosesser (støtte den primære brytningen). Spesielle anvendelser kan være relatert til forberedelse av areal eller volumet som skal brytes, dvs., tilleggs- eller sekundæroperasjoner. Arbeidet vil være prosjektspesifikk og vil i hovedsak avhenge av valgt brytningsmetode og forekomstegenskaper. Forberedende eller tilleggsarbeid inkluderer, men er ikke begrenset til, fjerning av overdekning og materiale som har falt ned i utdrevne volum som må knuses før innsamling, utjevning av terrenget (tilsvarende «flåsprengning» på land), utvikling av paller, adkomstveier og ramper.

Det kan også være fordelaktig eller nødvendig å bore brønner eller forankringshull, for eksempel for å sikre og stabilisere utstyr på havbunnen (kjøretøy, (selvgående) plattformer eller andre løsninger). Enhver løsning må imidlertid skreddersys til de spesifikke forholdene på stedet og oppgaven som skal løses.

Andre relevante teknologier finnes for eksempel i landbasert utvinning og i andre marine operasjoner. Imidlertid må teknologiene og metodene som anvendes i landbasert utvinning tilpasses det marine miljøet og tilpasses DSM. Denne rapporten viser bare noen av løsningene som kan være relevante for DSM (Figur 17).

⁷ I noen tilfeller kan sedimentet inneholde økonomiske relevante konsentrasjoner av metaller og klassifiseres som malm.



Figur 17 A: gravemaskin utstyrt med en hydraulisk ripper (med tillatelse fra XCentric⁸); B: gravemaskin med hydraulisk hammer (bilde med tillatelse fra Epiroc⁹); C: sagemaskin (med tillatelse fra Fantini¹⁰); D: utgravningsgrabb på dypt vann (med tillatelse fra Seatools¹¹).

Ukonvensjonelle metoder

I tillegg til de kjente tilnærmingene finnes det også mer ukonvensjonelle metoder. Dette er metoder som ikke anses som relevante nå, men som kan være et viktig tema for videre forskning og utvikling:

- **Utlaking**, som innebærer bruk av et enkelt eller flere forskjellige fluider som løser opp spesifikke elementer er ikke relevant hovedsakelig av juridiske, miljømessige, tekniske og økonomiske årsaker.
- **Eksploder / sprengstoff** er heller ikke relevant grunnet de samme årsaker som over (juridiske, miljømessige, tekniske og økonomiske årsaker).
- **Utvinning av metaller direkte fra hydrotermale væsker** som kommer opp gjennom aktive hydrotermalsystemer forventes ikke å ha noen betydning som teknologivalg ved utvinning av hydrotermale forekomster i utredningsområdet. Utsiktene til å finne nok hydrotermale systemer med kontinuerlig tilførsel av hydrotermale løsninger med innhold av verdifulle metaller (f.eks. Au, Ag, Cu) som er over en økonomisk grenseverdi (cut-off) anses som lav. Videre vurderes de produksjonsratene man ev. kan oppnå med en slik brytningsmetode som økonomisk ubetydelige.

Forskning på utvikling av miljøvennlige utlakingsprosesser og -teknologier kan være relevant. Ny forskning (Martens et al., 2021) viser at elektrokinetisk in situ utlaking har et potensial, men rapportforfatterne er av den oppfatning at mye

⁸ <https://xcentricripper.com/>

⁹ <https://www.epiroc.com/>

¹⁰ <https://www.fantinispa.it/>

¹¹ <https://www.seatools.com/>

forskning og utvikling er nødvendig før dette kan anses som en relevant metode for utvinning av mineraler på / fra havbunnen.

Videre vil det med tanke på Norge som et utgangspunkt for internasjonale aktiviteter innen utvinning av havbunnsmineraler, kunne være aktuelt å studere teknologier for direkte utvinning fra hydrotermale væsker siden man ikke skal utelukke at det kan finnes kommersielt relevante forekomster.

5.1.2 Skjæremekanismer og verktøy

For mekanisk utvinning er effektivt utstyr for skjæring / fragmentering avgjørende for en økonomisk lønnsom drift. Hva som er et effektivt utstyr er avhengig av hvor raskt materialet fragmenteres, energiforbruk og levetiden til utstyret. Avhengig av bergmasseeegenskapene og den spesifikke maskinen, er det tilgjengelig et stort antall skjære- eller kutteverktøy (brukes blant annet i driving av sjakter og kan være integrert med gassløft-løsninger (eng.: airlift)). Kutterne er laget av wolframkarbid med optimalisert geometri og et sett med kuttere kombinert til et kutterhode i henhold til den spesifikke operasjonen og maskinen. Det er en veletablert industri rundt kuttere for mineralutvinning, som kan levere optimaliserte verktøy, se eksempel i Figur 18 og Figur 19.



Figur 18 Testing av skjæreverktøy for mineralutvinning under vann (tester gjennomført vått på land) av SANDVIK i EU-prosjektet VAMOS! (2017).

Utfordringer med hensyn til mineralutvinning på stort vandndyp er knyttet til de begrensede data som finnes om bergmasseegenskaper og dermed skjære- og kutteprosessen under hyperbariske forhold (svært høyt hydrostatisk trykk). Alvarez Grima et al. (2018) observerte at både fragmentstørrelsen og kuttevolumet ble redusert og nødvendig kutteenergi økte under hyperbarisk trykk. Skjærekrefter i løpet av kutterens levetid og tilhørende strømforbruk er en viktig faktor for utformingen av brytningssystemet (behov for energi på havbunnen) og oppetid (minimert med vedlikeholdsstopp). Ideelt bør havbunnsproduksjonsutstyret forbli på havbunnen ved nødvendig vedlikehold, for eksempel ved å bytte hele skjærehodet.



Figur 19 Testing av bulkkutteren designet for Solwara 1-prosjektet til Nautilus Minerals. Kilde: Nautilus Minerals / DSM Observer¹².

¹² <https://dsmobserver.com/2018/01/nautilus-progressing-trials-in-png/>

5.1.3 Foreslåtte konsepter for vertikal utvinning

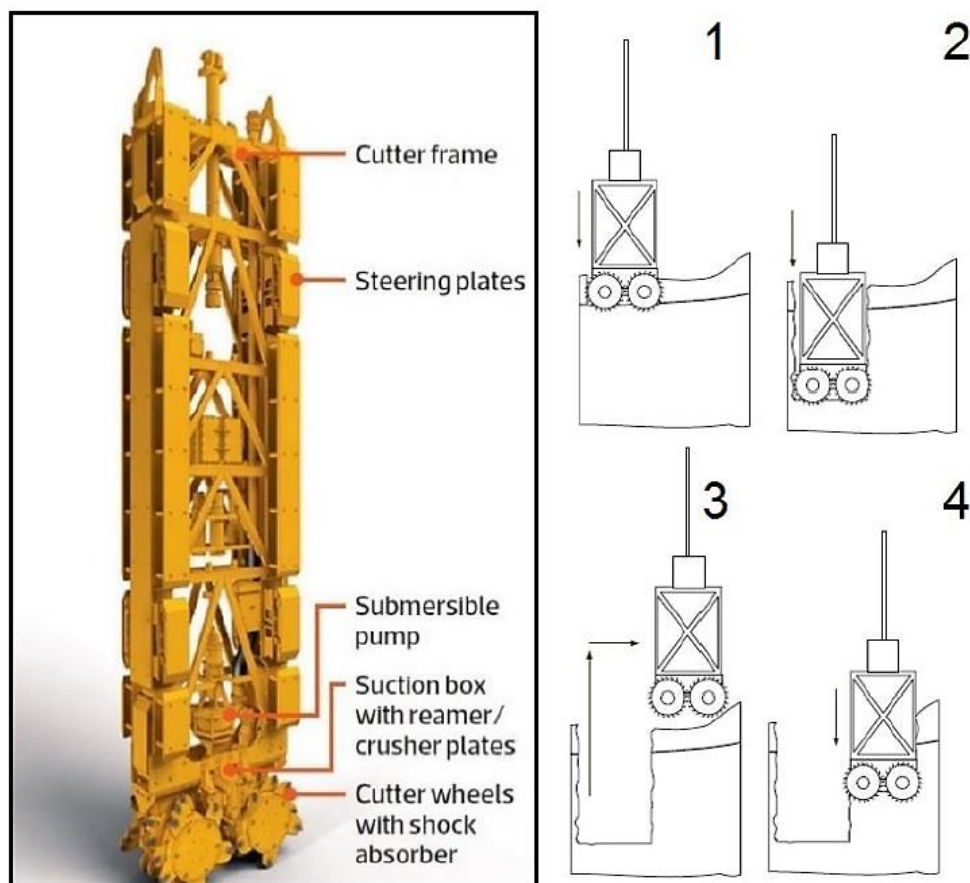
Selskaper som har publisert vertikale konsepter (både grøfting / kutting og selvgående konsepter) er for eksempel Bauer Maschinen GmbH og TechnipFMC. I tillegg har selvgående konsepter blitt foreslått av Keisuke et al. (2015) og Watanabe et al. (2016). Disse konseptene er forklart nærmere i det følgende.

Bauers grøftekonsept

Beskrivelse

Bauer Maschinen GmbH har utviklet et vertikalt konsept for utvinning av mineral fra havbunnen som er basert på et grøftekuttersystem som vanligvis brukes til utgraving av membranvegger i landkonstruksjoner og grunne marine anvendelser. Grøftekutteren består av en tung stålramme utstyrt med to skjærehoder. De to motroterende skjærehodene fragmenterer materialet, som suges inn i maskinen. Styreplater på rammen brukes for stabilisering og manøvrering under kutting.

Den generelle arbeidssyklusen dekker følgende trinn (se Figur 20): (1) plassering av skjæreverktøyet på bergoverflaten / stoffen, (2) samtidig kutting og sug for å løsne, plukke opp og transportere materiale, (3) hente verktøyet når en når planlagt dybde, flytte maskinen og (4) starte en ny arbeidssyklus.



Figur 20 Konsept for vertikal mineralutvinning foreslått av Bauer Maschinen GmbH ved hjelp av to motroterende kuttere for å fragmentere materialet som deretter suges opp i en parallell prosess. Forklaring av prosessen (bilder til høyre) er gitt i teksten (med tillatelse fra Bauer Maschinen GmbH¹³). Kilde: Spagnoli et al. (2016).

¹³ <https://www.bauer.de/bma/>

DSM-applikasjon

Dette konseptet er konseptualisert for havbunnsutvinning av sulfider. Selv om andre anvendelsesområder ikke er kjent eller spesifisert for det gjeldende konseptet, kan det ikke utelukkes at det finnes andre anvendelige områder (se 5.3 Vurdering av anvendelighet).

Teknologimodenhet

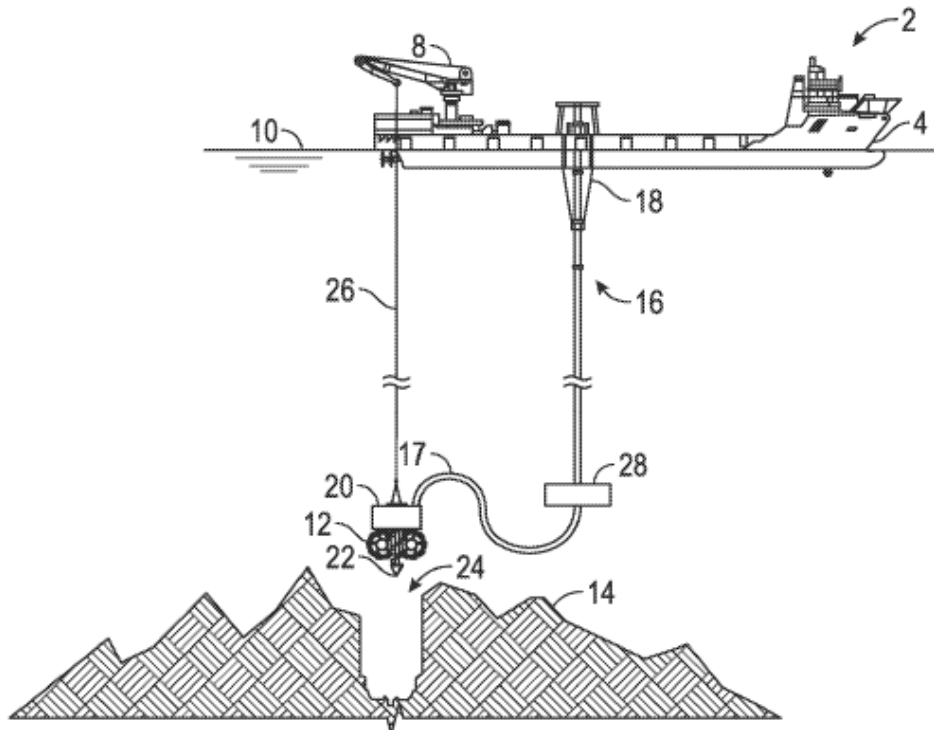
Grøftekuttere er kjent teknologi og brukes ofte til utgraving av spuntvegger («diaphragm walls») i landbasert konstruksjon og grunne marine anvendelser. Skjæretester er utført i laboratoriemiljø under hyperbariske forhold for å gjøre denne teknologien klar for mineralutvinning på dyphavet.

Teknologisk modenhetsnivå: 4

TechnipFMCs skjærekonsept

Beskrivelse

TechnipFMC har foreslått et patent som består av et vertikalt brytningssystem som ligner på Bauers grøfteskjæringskonsept. Maskinen fremstår som kompakt til tross for de store kutterne. En havbunnsstruktur og kutterramme brukes ikke, men verktøyet henger ned fra en kran ombord på produksjonsstøttefartøyet. Maskinen kan inneholde en form for stang- eller vribor for å løfte materialet som utvinnes opp mot pumpen. Spissen av stangboret kan inkludere et pilotbor for sideveis stabilisering av påhugget. Bruk av pilothull vil også kunne muliggjøre en driving av grøfter og hull der det ikke forekommer mellomrom mellom grøftene.



Figur 21 Konsept for vertikal mineralutvinning foreslått av TechnipFMC ved hjelp av to motroterende kuttere for å fragmentere materialet som kan heves til innsiden av maskinen ved å bruke en stangbor som bidrar til å stabilisere seg under boring. Med tillatelse fra TechnipFMC (fra patent: WO 2014/153494 A2)

DSM-applikasjon

Dette konseptet er konseptualisert for havbunnsutvinning av sulfider. Selv om andre anvendelsesområder ikke er kjent eller spesifisert for det aktuelle konseptet, kan de ikke utelukkes (se 5.3 Vurdering av anvendelighet).

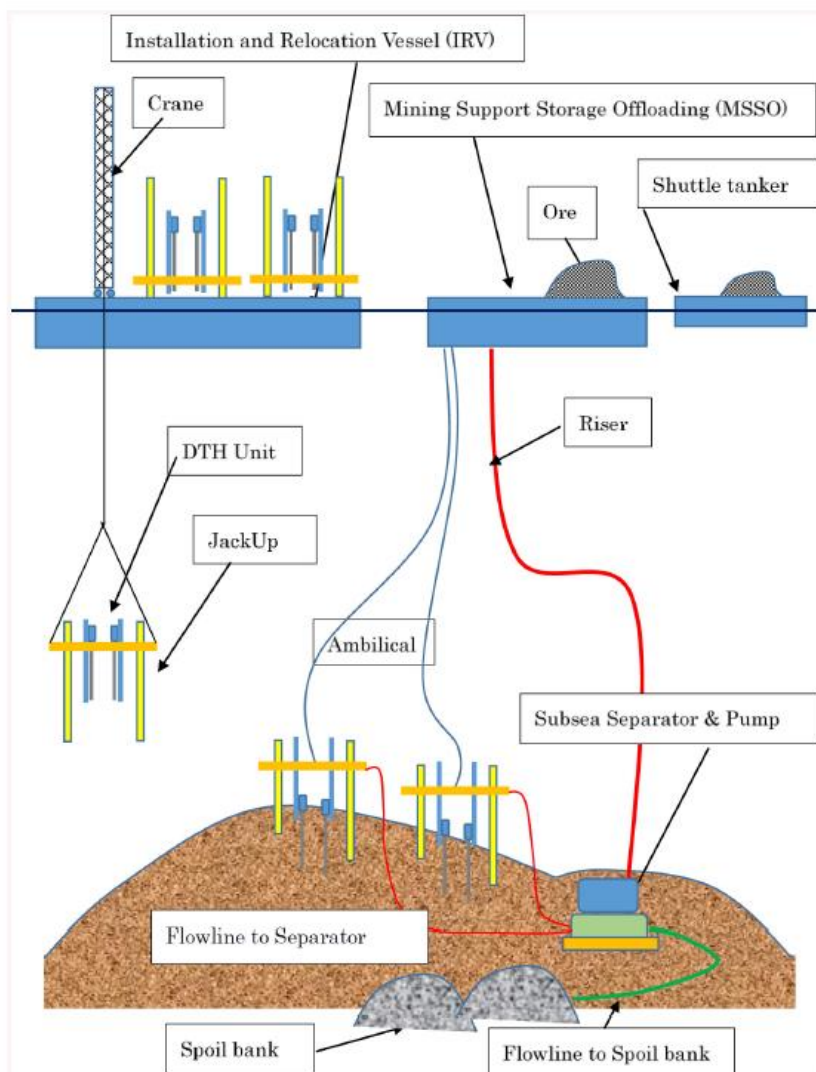
Teknologimodenhet

Dette har ikke vært testet og er på patentnivå.

Teknologisk modenhetsnivå: 2

Selvgående konsepter for vertikal mineralutvinning

Keisuke et al. (2015) og Watanabe (2016) presenterer et konsept for vertikal mineralutvinning som ved hjelp av boreenheter (DTH'er) med varierende borekronediametre borer ut malmen. Boreenhetene er festet til en plattform med justerbare ben. Benene tillater bruk i bratte skråninger. Ingen havbunnskusing er nødvendig siden borekasset (den utborede massen) kan transporteres til plattformdekkets som den er. Figur 22 illustrerer konseptet.



Figur 22 Fra Keisuke et al. (2015). Pilot hull med liten diameter bores i trinn 1. Deretter blir disse pilot hullene utvidet (rømmet opp) for å øke diameteren og utvinne malmen.

DSM-applikasjon

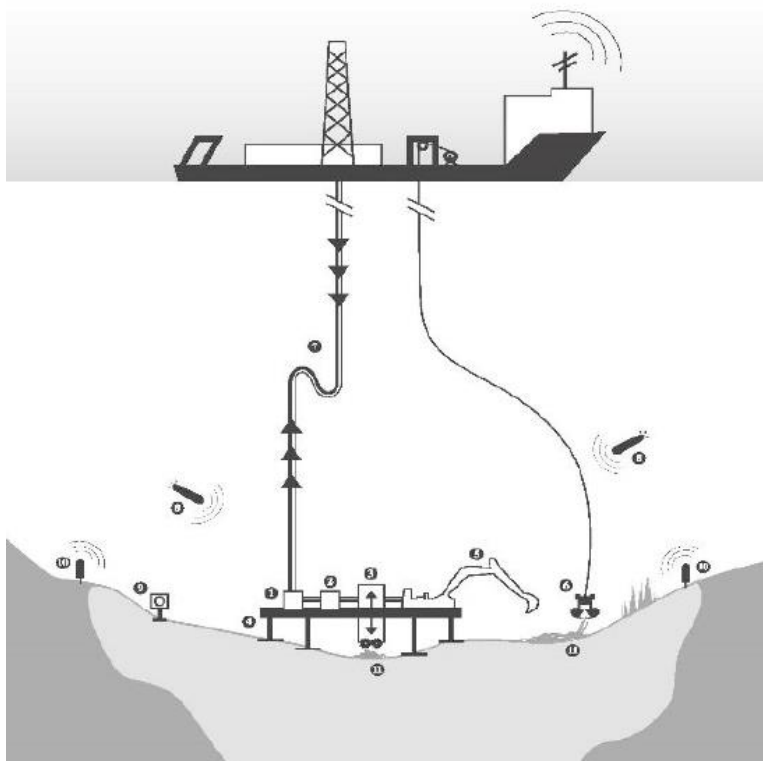
- Dette konseptet er konseptualisert for havbunnsutvinning av dypmarine sulfider. Det kan tenkes å bli brukt til manganskorpe også, men det er ikke undersøkt.

Teknologimodenhet

Dette har ikke vært testet og er på konseptnivå.

Teknologisk modenhetsnivå: 2

Ideen om å bruke plattformer på havbunnen ble også publisert av Bauer og TechnipFMC (se Figur 23). Ikke mye er kjent om dette konseptet utover at plattformkonseptet kan bære forskjellige typer utstyr. I figuren under er det en vertikal kutter (3) og en gravemaskin (5) for å løsne og samle materiale fra havbunnen og en knuse- og bufferenhet (2). Det er ikke kjent om dette konseptet var ment å være helt selvgående, men tidseffektiv flytting ville ha vært et grunnleggende krav. Fra DSMA (2017).



Figur 23 Et konsept med en selvgående plattform vurdert av Bauer og TechnipFMC.

DSM-applikasjon

Dette konseptet er konseptualisert for havbunnsutvinning av dypmarine sulfider.

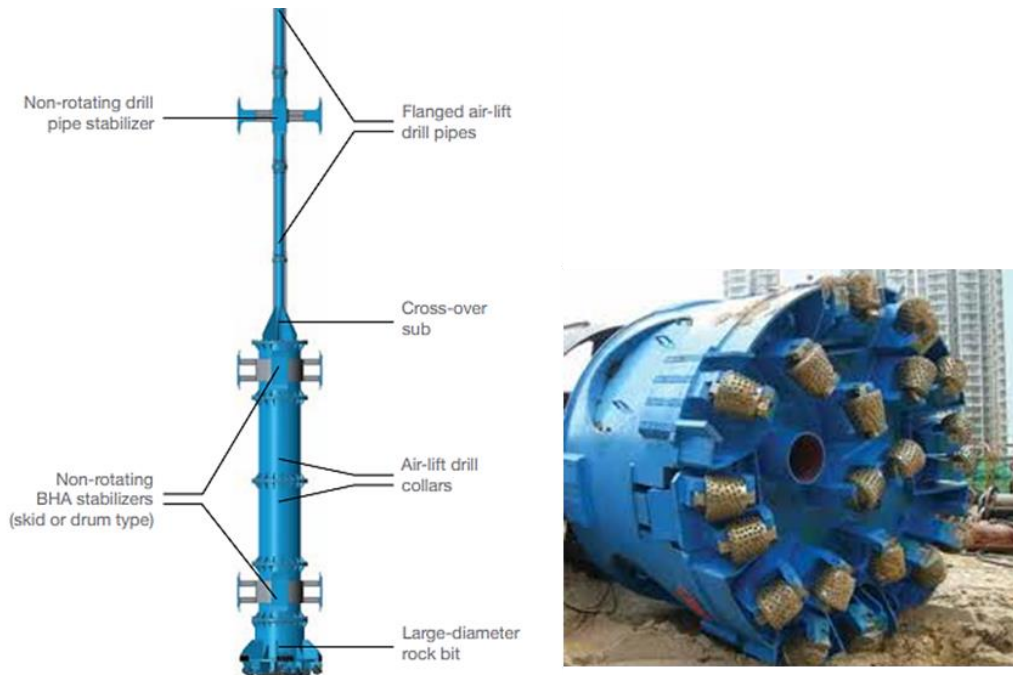
Teknologimodenhet

Kun grunnleggende prinsipper er observert og beskrevet.

Teknologisk modenhetsnivå: 2

Relaterte teknologier

Relaterte teknologier er brukt i offshore utvinning av diamanter og i mudring. De Beers bruker for eksempel store vertikaleboresystemer for å bringe diamantbærende grus til overflaten. MHWirth (Figur 24) leverer slike systemer ved hjelp av et bor med stor diameter for å fragmentere konsolidert materiale fra havbunnen ved hjelp av boring med omvendt sirkulasjon (Reverse Circulation Drilling (RCD)).¹⁴



Figur 24 Vertikal utvinningssystem brukt i offshore utvinning av diamanter. Fremgangsmåten benytter en borekrone med stor diameter og omvendt sirkulasjon (Reverse Circulation Drilling (RCD)). Med tillatelse fra MH Wirth.

Relevante teknologier fra tunnelarbeider på land er for eksempel maskiner for driving av (vertikale) sjakter, f.eks. "Shaft Boring Machines" og "Shaft Boring Roadheaders" fra Herrenknecht (se Figur 25)¹⁵. Imidlertid krever disse store systemene med borekronediametre på opptil 10 meter, installasjon av en infrastruktur på overflaten for å senke boreverktøyet, og teknologiene er ikke tilpasset marine forhold.

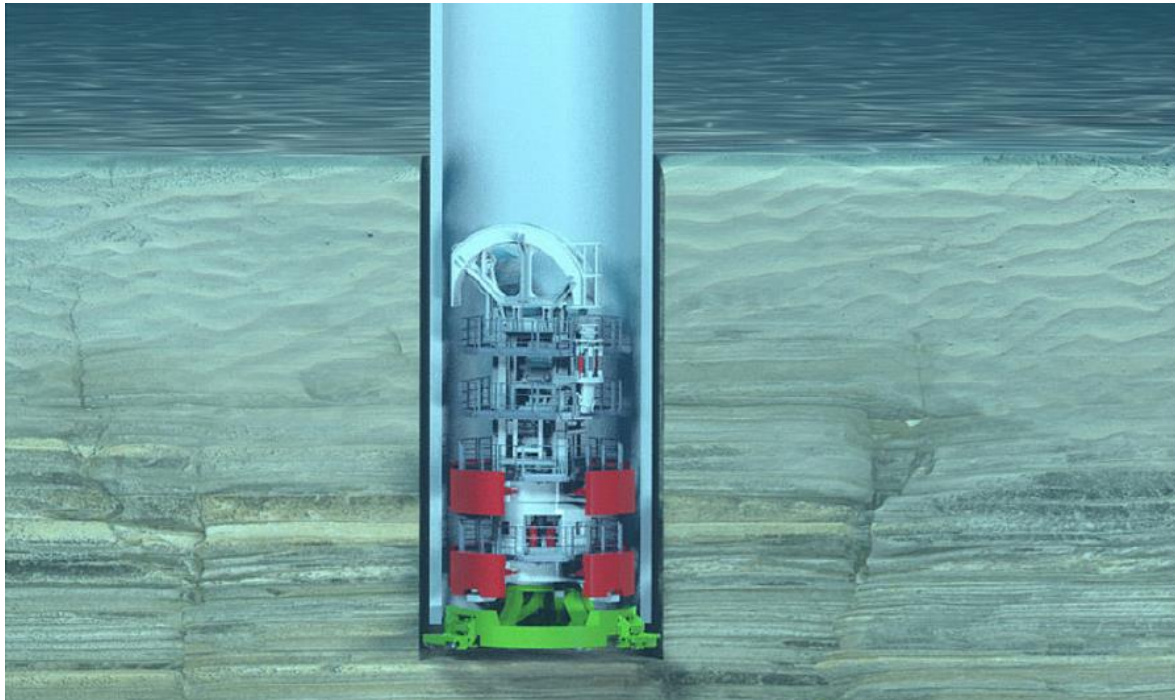
¹⁴ <https://mhwirth.com/our-products-2/large-diameter-reverse-circulation-subsea-drilling/>

¹⁵ <https://www.herrenknecht.com/en/products/mining/>



Figur 25 En oversikt over ulike akselborings- eller synk-, sjaktborekonsepter (med tillatelse fra Herrenknecht AG¹⁶).

Teknologier fra offshore fundamentboring kan også være relevante for utvinning av sulfidmalmer; verdt å nevne er borekonseptet til Herrenknecht AG (se Figur 26).



Figur 26 Konsept for offshore fundamentboring (foundation drilling, OFD) (med tillatelse fra Herrenknecht AG).

¹⁶ <https://www.herrenknecht.com/en/products/mining/>

Utstyrskonsepter for prøvetaking og grabber mulig brukt i støtte- og sekundærprosesser i utvinning er blant annet presentert i Van Bloois and Frumau (2009) og Okamoto et al. (2019a). De er ikke beskrevet i ytterligere detalj grunnet deres lave TRL-nivå.

5.1.4 Foreslåtte konsepter for horisontal mineralutvinning

Horisontale konsepter har blitt publisert eller patentert av Nautilus Minerals for sulfidforekomsten Solwara 1 og av Japanske JOGMEC for utvinning av sulfider og for skorpe.

Nautilus Minerals' konsept for dypmarin mineralutvinning

Beskrivelse

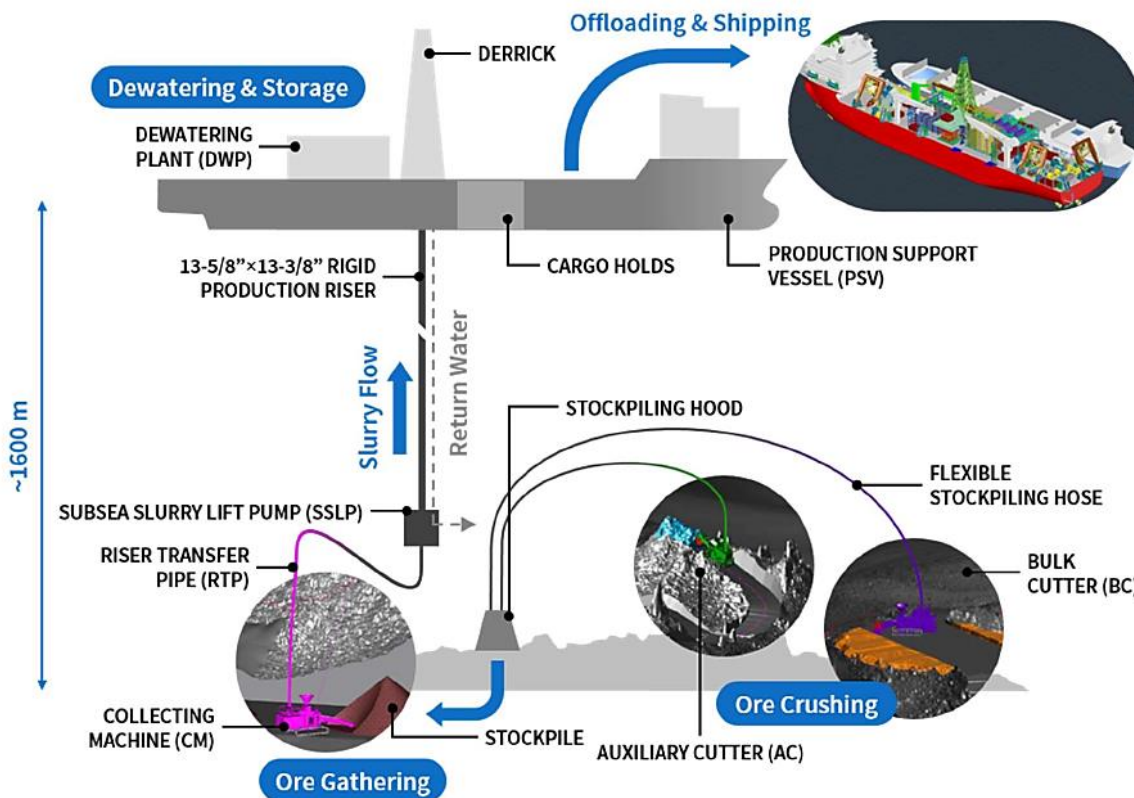
Det mest kjente er skjære- og kutteutstyret til Solwara 1-prosjektet bestilt av Nautilus Minerals Inc. De ble designet og bygget av Soil Machine Dynamics Ltd (SMD), Storbritannia. I dette konseptet inngår tre typer kuttere: En «hjelpeskutter» (Auxiliary Cutter, AC) som jevner ut varierende havbunnstopografi og klargjør dermed stoffen, en «bulk-kutter» (Bulk Cutter, BC) som fragmenterer majoriteten av malmen og «opsamlingsmaskinen» (Collecting Machine, CM) som er bindeleddet mellom fragmentert malm på havbunnen og vertikaltransportssystemet, se Figur 27.



Figur 27 Tre typer maskiner designet og bygget av SMD for Solwara 1 DSM-prosjektet til Nautilus Minerals: The Collecting Machine (til venstre), "Bulk Cutter" (i midten) og "Auxiliary Cutter" (til høyre); med tillatelse fra Deep Sea Mining Finance Limited¹⁷.

Maskinene jobber i serie. Hjelpeskutteren og bulkkutteren løser havbunnsmaterialet i en kontinuerlig skjæreprosess og etterlater den fragmenterte malmen for innsamling av oppsamlingsmaskinen. Hjelpeskutteren forbereder stoffen – og skaper veier, ramper og benker som bulkkutteren kan arbeide på med en relativt sett høy produksjonskapasitet. Kutting utføres hovedsakelig foran maskinen ovenfra og ned på stoffen. Oppsamlingsmaskinen samler deretter den fragmenterte malmen og transporterer den til det vertikale transportsystemet (VTS). I et annet konsept samles den fragmenterte malmen av hjelpe- og bulkkutteren og pumpes via fleksible slanger til mellomlagring på et bestemt sted på havbunnen, hvor oppsamlingsmaskinen samler materialet og mater systemet for vertikaltransport, se Figur 28.

¹⁷ <https://dsmf.in/>



Figur 28 Illustrasjon av brytningssystemet og prosesskjeden skreddersydd for Nautilus Minerals' Solwara 1-prosjekt (tillatelse gitt av Deep Sea Mining Finance Limited¹⁸).

DSM-applikasjon

Dette konseptet er laget for havbunnsutvinning av sulfider og er skreddersydd til Solwara 1-forekomsten og de rådende forhold der. Selv om andre anvendelsesområder ikke er kjent eller spesifisert for det aktuelle konseptet, kan de ikke utelukkes (se 5.3 Vurdering av anvendelighet).

Teknologimodenhet

Maskinene som ble designet og bygget av SMD (se Figur 28) ble testet vått, men aldri testet i et relevant miljø fordi Nautilus Minerals gikk konkurs.

Teknologisk modenhetsnivå: 4

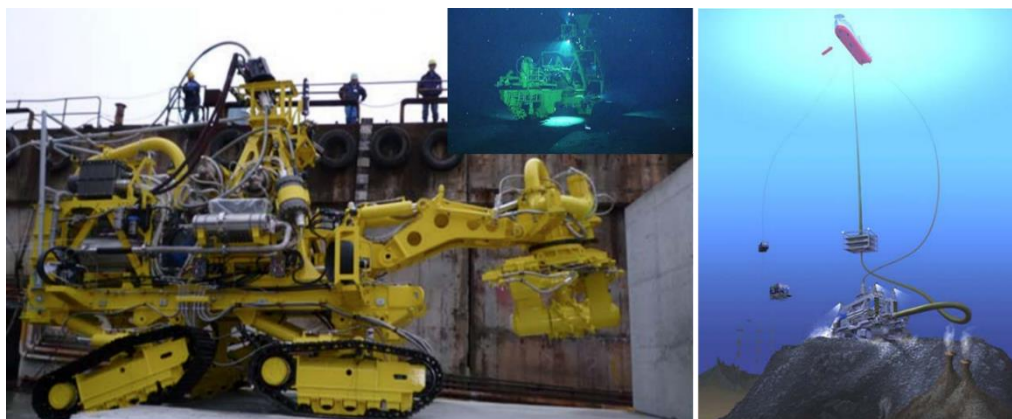
JOGMECs konsept for mineralutvinning

Beskrivelse

En metode og fremgangsmåte som ligner på konseptet til Nautilus, er utviklet av Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC). To typer utstyr for mineralutvinning på havbunnen ble utviklet og testet i relevant miljø, i Okinawa Trough, for å samle og løfte malm (Okamoto et al., 2019b). Det første utstyret for mineralutvinning er et 4-crawlersystem (4 belter) med et multiaksekutterhode (Figur 29). Det andre systemet er et 2-crawlersystem (Figur 30) som er sammenlignbart med utstyr som brukes i kullindustrien på land og i tunneldriving.

¹⁸ <https://dsmf.im/>

Den spesielle egenskapen til JOGMECs første maskin er de fire høydejusterbare beltene som gjør det mulig å klatre i bratte skråninger og bevege seg i ulendt terreng (se Figur 29). Kutting og sug utføres parallelt i en enkelt og kontinuerlig prosess. Skjære- og sugeverktøyet presses vertikalt på havbunnen og skjærer inn i havbunnen opp til flere titalls centimeter under stoffen. Det fragmenterte materialet suges opp og pumpes gjennom maskinen til systemet for vertikaltransport.



Figur 29 Bilde av JOGMECs 4-crawler testmaskin (venstre) og illustrasjoner som viser en fremtidig utvinning i dyphavet (høyre). Bilder gjengitt med tillatelse fra JOGMEC.

Testene benyttet også en annen type utstyr for utvinning (Okamoto et al., 2018; Okamoto et al., 2019b). Denne andre maskinen kan bevege seg på hardt substrat og mykt sediment og kan brukes som en knuseenhet ved å erstatte kutterhodet med en kjefteknuser (høyre i Figur 30).



Figur 30 Testing av utvinningsutstyret med to belter og kutterhode (venstre) og det samme utstyret der kutterhodet er erstattet av en kjefteknuser (test på land; høyre). Bilder gjengitt med tillatelse fra JOGMEC.

DSM-applikasjon

Disse prototypene ble designet og testet for sulfidmalmer og manganskorper.

Teknologimodenhet

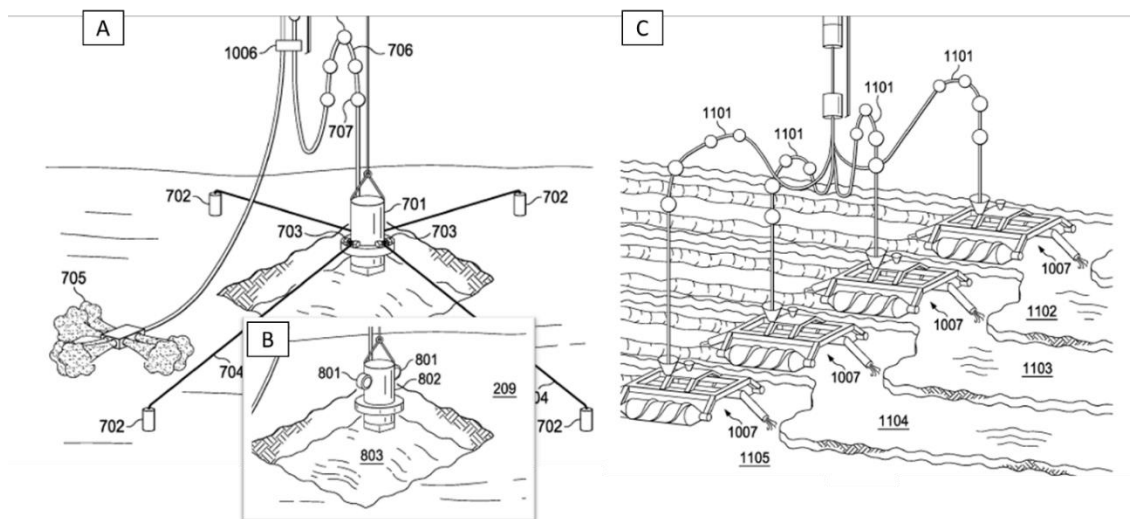
JOGMEC har gjennomført verdens første (fullt integrerte) tester i relevante miljø for sulfidmalmer og skorper. I september 2017 gjennomførte JOGMEC verdens første pilot-skala eksperiment av utvinning / fragmentering og løfting / vertikaltransport av malm fra en sulfidforekomst fra rundt 1600 meters vanddyb i Okinawa Trough. I 2020 samlet JOGMEC ~650kg koboltrike skorper fra rundt 900 meters vanddybde i områder nær det undersjøiske fjellet Takuyo No. 5 som ligger i Japansk EEZ sør for Minamitorishima. Selv om testingen inkluderte fragmentering og løfting i en integrert prosess, er dette ikke kjørt i full skala over tid.

Teknologisk modenhetsnivå: 6

Deep Reach-teknologien

Beskrivelse

Det finnes flere patenter for utvinning av skorpe- og sulfidforekomster. Deep Reach Technology har foreslått metoder der spesielle utvinningsenheter flyttes over et definert overflateareal, og kontinuerlig utdyper utvinningsområdet (se A i figur under). Et vinsjauttrekingsystem eller thrustersystem foreslås (se Figur 31 A, B). I et annet konsept foreslås horisontal utvinning basert på arkimedeskruer (se Figur 31 C). Kjente prototyper finnes ikke.



Figur 31 Figur A og B viser et spesielt konsept der utvinningsutstyret flyttes over et definert område med en type vinsjsystem eller skyvesystem. Figur C viser et utvinningsystem på havbunnen basert på arkimedeskruer. Med tillatelse fra Deep Reach Technology (fra patent WO 2017/035344 AI).

DSM-applikasjon

Dette konseptet er utviklet primært for havbunnsutvinning av sulfider, men kan eventuelt også anvendes på andre forekomsttyper.

Teknologimodenhet

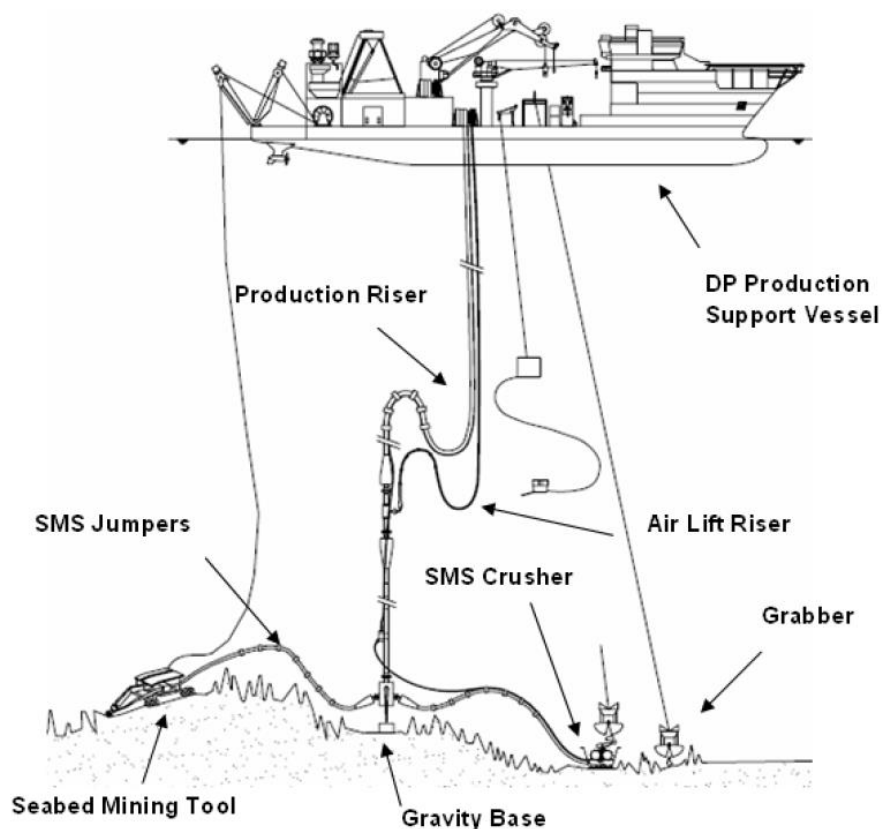
Det patenterte Deep Reach Technology-konseptet er ikke testet, verken i laboratoriet eller i felt.

Teknologisk modenhetsnivå: 2

Neptunesystemet

Beskrivelse

Neptune-systemet (Yu og Espinasse, 2009) består av to forskjellige og uavhengige verktøy for malmutvinning; 1) En grabb utplassert fra en A-ramme på produksjonsstøttefartøyet og 2) et beltegående produksjonsutstyr, se Figur 32. I dette konseptuelle systemet vil grabben bli brukt til overdekning, inkludert skorsteinene og det beltegående produksjonsutstyret med en steinkutter og en pumpe vil bli brukt til hoveddelen av utvinningen. Fragmentert materiale vil bli knust av knuseenhet («SMS crusher» i Figur 32) på havbunnen før vertikal transport. Malmen vil bli transportert gjennom fleksible rør til bunnen av det fleksible S-formede vertikale stigerøret. Gassløft (airlift) med luft- eller nitrogeninjeksjon på 1000 meters vanddybde er foreslått som løfteteknologi i dette systemet.



Figur 32 Neptune-systemet (Yu og Espinasse, 2009).

DSM-applikasjon

Systemkonseptet inkluderer aktivitet på havbunnen, vertikaltransport og på havoverflaten. Konseptet er primært utviklet for dypmarine sulfidforekomster, men avhengig av fremtidig eventuell design av utvinningsutstyret vil det også kunne brukes på skorpe.

Teknologimodenhet

Dette er et konsept som kom ut av en mulighetsstudie som så på teknologier for kommersiell utvikling av sulfidforekomster utenfor New Zealand. Det er ikke testet, verken i laboratoriet eller i felt.

Teknologisk modenhetsnivå: 2

Technip (nå TechnipFMC) utvinningsystem for utfordrende værforhold

Beskrivelse

Parenteau et al. (2013) presenterer et utvinningsoppsett spesielt designet for utfordrende værforhold. Utformingskriterier er:

- Gjennomsnittlig bølgehøyde = 6,5 m, maksimal bølgehøyde = 12m, strøm 0,4 m/s.
- Vanddybde: fra til 1000 meter til 2000 meter
- Produksjonskapasitet ved pilotskala: 500 000 tonn tørr sulfidmalm over 6 måneder (3300 tonn per dag)
- Produksjonskapasitet i full skala: 2 000 000 tonn tørr sulfidmalm per år (6600 tonn per dag)
- Tetthet: fra 3000 kg/m³ til 5000 kg/m³.

Et fleksibelt stigerør brukes i kombinasjon med et havbunnsverktøy, en grabb og en havbunnsknusings- og mateenhet. Pumpeutstyret plasseres på dekket for å muliggjøre enkelt vedlikehold. Systemoppsettet er basert på bruk av positiv fortrenningspumpe, men kan settes opp med gassløft (airlift).

DSM-applikasjon

Utviklet for utvinning av dypmarine sulfidforekomster.

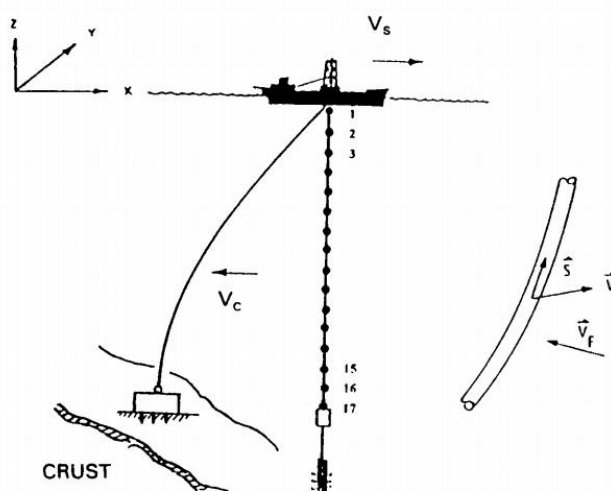
Teknologimodenhet

Dette er et konsept er utviklet spesielt for utfordrende værforhold. Det er ikke testet, verken i laboratoriet eller i felt.

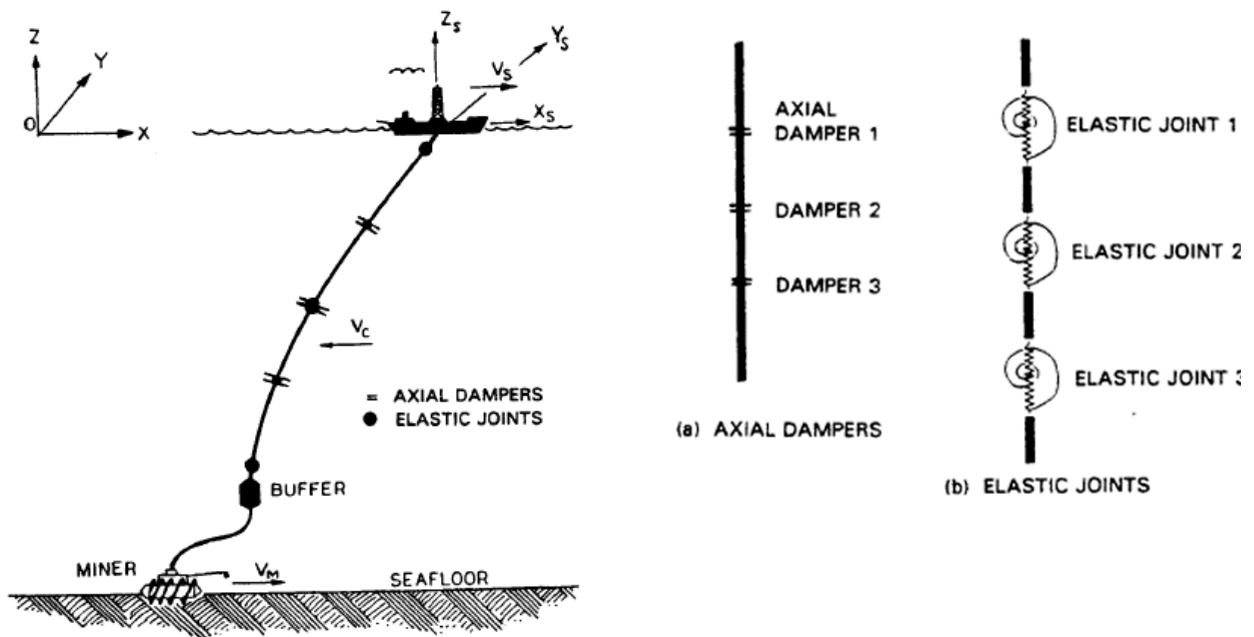
Teknologisk modenhetsnivå: 2

Skorpeutvinningsystem

Chung (1994) og Chung (1996) presenterer et konsept for skorpeutvinning basert på en vannjet og en vibrator for å knuse skorpen i fragmenter som er små nok til å samles og transporteres til løftesystemet. To systemer presenteres, ett ved hjelp av et rørsystem på 1200m og ett med et rørsystem på 5500m. Se skisser i Figur 33 og Figur 34.



Figur 33 System for utvinning av skorpe eller noder med et rørsystem på 1200m (Chung, 1996).



Figur 34 System for utvinning av skorpe eller noder med et rørsystem på 5500m. Utstyret på havbunnen påvirkes ikke av bevegelse fra dekket på grunn av de foreslåtte dempe- og elastiske leddene. Fra (Chung, 1996).

DSM-applikasjon

Utviklet for utvinning av skorpe.

Teknologimodenhet

Fremdeles kun et konsept som ikke er testet, verken i laboratoriet eller i felt.

Teknologisk modenhetsnivå: 2

Landbasert utstyr og koblingen til mineralutvinning på havbunnen

Generelt må ny teknologi eller tilhørende teknologier utvikles, skreddersys eller tilpasses rådende forhold. Konsepter må tilpasses et marint miljø (mariniseres) og testes for mineralutvinning på havbunnen, for eksempel borekonsepter med stor diameter (se Figur 24), eller konseptene foreslått av Deep Reach Technology (se Figur 31).

«Bulk Cutteren» foreslått av Nautilus Minerals er nærmest som en "Continuous Miner" som ofte brukes i utvinning av kaliumkarbonat / pottaske eller kull under jord. «Surface Miner» er et annet utstyr som bruker en eller flere store skjæretromler foran eller midt på maskinen for å bryte opp fjellet. Den brukes ofte i veibygging og i kull-, gips-, salt-, fosfat-, bauksitt- eller kalkdagbrudd, se Figur 35.



Figur 35 En «surface miner» som brukes i utvinning i dagbrudd (bilde med tillatelse fra Vermeer).

Prototypen til hjelpekutteren til Nautilus Minerals og JOGMEC sitt utstyr kan sammenlignes med "Roadheaders", (se Figur 36), som ofte brukes i mineralutvinning under jord for kontinuerlig å drive ut orter (tunnel uten åpning til dagen), strosser (større åpne rom under jord) osv. De kan også brukes til å utvinne råvarer som kaliumklorid og kull. Den hydrauliske bommen gir høye frihetsgrader, mens skjærehodet er geometrisk optimalisert for spesifikke jobber og miljøet den skal jobbe under.



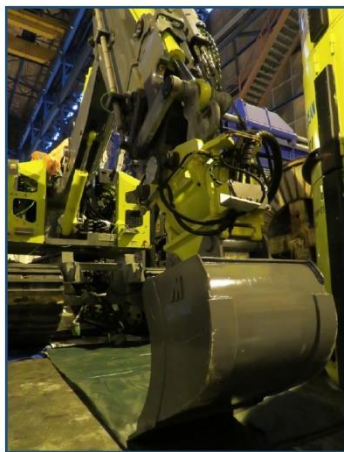
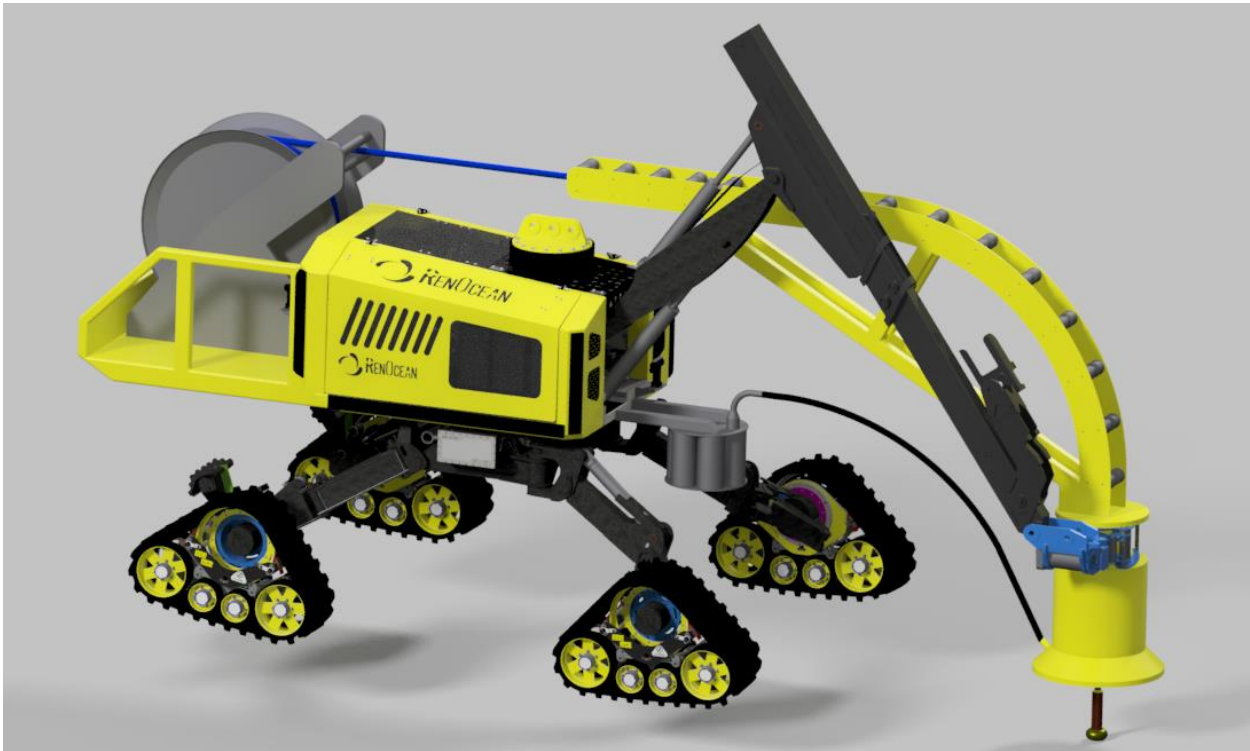
Figur 36 Bilde som viser en Roadheader med et geometrisk optimalisert kutterhode, som er designet for å kontinuerlig grave ut veier, tunneler etc. (bilde med tillatelse fra Sandvik).

5.2 Norsk aktivitet innen utvinning av havbunnsmineraler

RenOcean konseptet

Beskrivelse

RenOcean er en norsk teknologileverandør av et konsept som potensielt kan brukes som hjelpe- eller støtteutstyr, men også for horisontal mineralutvinning, da det kan utstyres med ulike verktøy av forskjellige størrelser (Figur 37).



Figur 37 Ulike utskiftbare mulige verktøy for REN Spideren som forslagsvis kan brukes i utvinning av mineraler fra havbunnen. De er designet for forskjellige jobber og brukes hovedsakelig tilknyttet til fornybar energi og O&G-operasjoner. Med tillatelse fra RenOcean.

DSM-applikasjon

RenOcean-konseptet må fortsatt optimaliseres for DSM. Imidlertid brukes konseptet allerede innen fornybar- og olje- og gassindustrien, for reparasjon og vedlikehold, installasjon og dekommisjonering. Fokus vil være på å optimalisere selve REN Spider'en som skal bære de ulike verktøyene (se Figur 37), Overgangen til DSM er derfor ikke så stor.

Teknologimodenhet

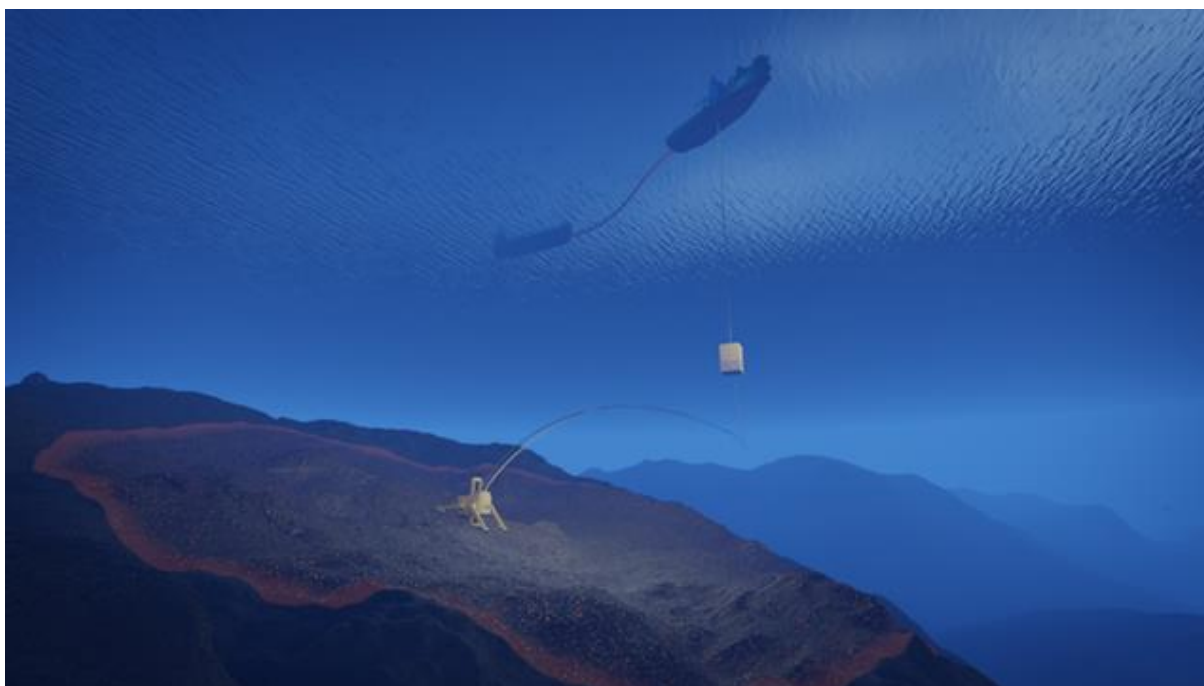
Teknologien er relativt moden, men må optimaliseres og testes for DSM på store dyp.

Teknologisk modenhetsnivå: 5

Loke Minerals sitt utvinningskonsept for sulfider og skorper

Beskrivelse

Det norske selskapet Loke Minerals har utviklet konsept for utvinning av sulfider og skorper og da spesielt med henblikk på den norske sokkelen. Konseptene bygger på å bruke teknologi som brukes i olje- og gasssektoren og tilpasse denne til utvinning av sulfider og skorper. Konseptet består av et produksjonsstøttefartøy, undervannsverktøy for utvinning, et vertikalt transportsystem (stigerør) for å transportere malmen opp til produksjonsfartøyet og et system for å laste over malmen på et lastefartøy som kan transportere malmen til land, se Figur 38.



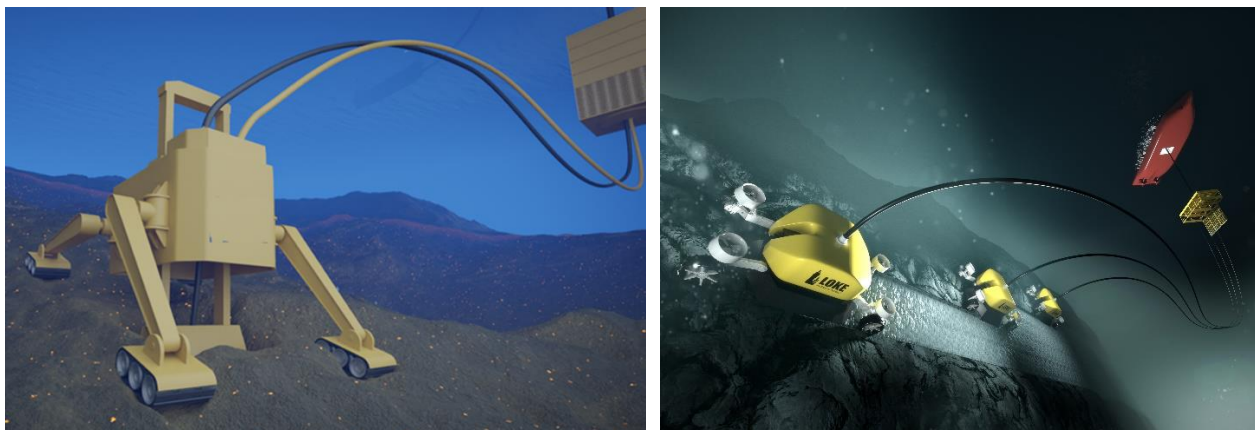
Figur 38 Loke Minerals konsept for utvinning av sulfider og skorper (annet verktøy). Illustrasjon med tillatelse fra Loke Minerals.

DSM-applikasjon

Konseptdelen som omhandler selve utvinningen av sulfider på havbunnen, består av et undervannsverktøy som kan senkes ned på og løftes fra havbunnen. Undervannsverktøyet er designet slik at det også er mulig å lande det på ujevn havbunn og selve forflytningen på havbunnen foregår med belter som verktøyet er utstyrt med, se Figur 39 (til venstre). Undervannsverktøyet er fjernstyrt fra produksjonsfartøyet. Det skal være mulig å utføre både vertikal og horisontal malmutvinning med verktøyet. Selve kuttingen av malmen foregår med kutterhoder som sitter på verktøyet og denne

teknologien er allerede tilgjengelig fra landbasert mineralindustri. Verktøyet vil kreve spesiell design for operasjoner på dypvann, bl.a. for å unngå partikkelskyer og for å sikre høy nok effektivitet.

Konseptdelen som omhandler selve utvinningen av skorper på havbunnen, består av flere små verktøy som er oppdriftskompensert og som kan svømme fra garasje til posisjon på havbunnen, se Figur 39 (til høyre). De kan kjøre i autonom formasjon med intern kommunikasjon og dermed gi samme effekt som et større verktøy. Verktøyene kan operere på flater med opptil 90 graders helning og verktøyene har mange bevegelige kuttehoder som kan "rense" en ujevn flate. De kan også utstyres med skjørtfunksjon som hindrer partikkelspredning ved kutting og bidrar til direkte oppsamling av kuttet materiale.



Figur 39 Loke Minerals konsept for utvinning av sulfider (til venstre) og utvinning av skorper (til høyre). Illustrasjon med tillatelse fra Loke Minerals.

Teknologimodenhet

Loke Minerals planer for utvinning av sulfider og skorper bygger for en stor del på erfaringer fra olje- og gassindustrien. Foreløpig er det på konseptnivå.

Teknologisk modenhetsnivå: 2

Seabed Excavator og FlexiCore

Beskrivelse

De norske selskapene ADEPTH Minerals og Seabed Solutions har utviklet et teknologikonsept der en benytter en eksisterende plattform («verktøybærer») som er elektrisk og beltegående. Plattformen, Seabed Excavator, er et fleksibelt og kraftig undervannsfartøy som er designet for bruk ned til 4000 m, og har tidligere gjennomført prosjekter på 3200 m. Maskinen utstyres og videreutvikles med utstyr for kjerneprøvetaking på havbunnen (FlexiCore). Seabed Excavator og kjerneboreutstyret fjernstyres fra et offshore servicefartøy.

FlexiCore er et egenutviklet kjerneprøvetakingsutstyr basert på teknologi og utstyr fra landoperasjoner, hvor utstyrskomponenter skiftes ut og utstyret tilpasses operasjoner på store havdyp med mulighet for spesialtilpasning, se Figur 40.



Figur 40 Det egenutviklede kjerneprøvetakingsutstyret (med tillatelse fra Seabed Solutions og Adepth Minerals).

DSM-applikasjon

Den nye teknologien skal kunne ta flere og bedre kjerner på havbunnen raskere og være et viktig element for å realisere kunnskapsinnhenting til en lavere kostnad.

I første omgang er det tenkt at utstyret benyttes for datainnsamling relatert til evaluering av mineralpotensialet på norsk sokkel. Det kan være forskningsinstitusjoner, men også kommersielle aktører som ser på teknologien som komplementær til egen offshoreteknologi.

På nåværende tidspunkt er utstyret ikke utviklet for utvinning av havbunnsmineraler, men det kan være mulig å modifisere verktøybæreren slik at den kan utnyttes også til utvinning.

Teknologimodenhet

Dette bygger på teknologi og utstyr fra landoperasjoner. Nå er det utviklet til kjerneprøvetaking (leting). Det må videreutvikles for å kunne brukes til utvinning av havbunnsmineraler.

Teknologisk modenhetsnivå: 2

Green Minerals sitt utvinningskonsept

Beskrivelse

Det norske selskapet Green Minerals, som er skilt ut fra morselskapet Seabird Exploration, har planer om å drive med dypmarin mineralutvinning på og nær Mohnsryggen. Green Minerals ble børsnotert (Euronext Growth) i mars 2021.

Utvinningskonseptet til selskapet går ut på at de vil bygge et komplett system for produksjon av marine mineraler. De vil basere seg på å kombinere etablerte teknologier fra mineralindustrien og fra offshore olje- og gass. Green Minerals har som mål å modifisere disse teknologiene for å optimalisere produksjon og kostnader for utvinning av havbunnsmineraler.

Green Minerals vil dekke hele verdikjeden for havbunnsmineraler (se Figur 41) og samarbeider med ledende akademiske institusjoner og teknologibedrifter.



Figur 41 Green Minerals konsept for utvinning av havbunnsmineraler. Tallene på figuren viser: 1. Leting, 2. Utvinning / Produksjon, 3. Offshore logistikk (fartøyer etc.), 4. Prosessering av malmen, 5. Levering til sluttbruker (f.eks. batterifabrikk). Illustrasjon med tillatelse fra Green Minerals AS.

DSM-applikasjon

For selve utvinningen ser Green Minerals for seg et system av maskiner på havbunnen, et vertikalt transportsystem (stigerør eller konteinere), et system på vannoverflaten (fartøy) for å mellomlagre malmen til den overføres til et bulkskip for transport til land.

Teknologimodenhet

Dette bygger på et konsept hvor man vil samarbeide med akademiske institusjoner og teknologibedrifter for utvikling av teknologikjeden for utvinning av havbunnsmineraler.

Teknologisk modenhetsnivå: 2

Scanmudring

Beskrivelse

Det norske selskapet Scanmudring AS har nesten 40 års erfaring med undervannsarbeid med fjernstyrt utstyr. Typiske arbeider man har erfaring med er boring i fjell på sjøbunnen og knusing av fjell på sjøbunnen inkludert pumping av det knuste materialet.

Det egenutviklede utstyret som brukes til slike arbeider kalles «ScanMachine» og den kan utstyres med ulike verktøy for å utføre arbeider i fjell, stein og løsmasser på havbunnen. Teknologien er opprinnelig landbasert som så er blitt marinisert. ScanMachine i sin nåværende form er godkjent for arbeider ned til 3500 meters vanddyb. Den fjernstyres av en operatør som sitter ombord på overflatefartøyet og den finnes i forskjellige størrelser og skreddersys for oppgaven som skal utføres. Se Figur 42.



Figur 42 Venstre øverst: ScanMachine utstyrt for mudring. Høyre øverst: ScanMachine utstyrt for boring. Venstre nederst: Fres til ScanMachine. Høyre nederst: Fres i arbeid på sjøbunnen. Illustrasjon med tillatelse fra Scan Mudring.

DSM-applikasjon

Scanmudring leverer utstyr til bl.a. følgende oppgaver:

Leting - Utstyr av ROV type (ScanMachine) til prøvetaking av fjell i form av kjerneprøver, eller knust fjell som kan pumpes / suges til konteiner eller direkte opp til fartøyet.

Utvinning – Designe, bygge og operere utstyr av ROV type (ScanMachine) til utvinning av havbunnsmineraler. Mineraler kan freses / bores / kappes og pumpes / suges til konteiner eller direkte opp til fartøyet.

Teknologimodenhet

Selskapet har lang erfaring med lignende oppgaver som utvinning av mineraler, men på mindre dyp. Eksisterende utstyr er allerede godkjent for havdyp ned til 3500m, men det antas at det kreves noe modifisering for utvinning av havbunnsmineraler.

Teknologisk modenhetsnivå: 5

5.3 Vurdering av anvendelighet

Det eksisterer ikke et utvinningssystem som passer til alle forhold, men det finnes konsepter som er bedre og mer anvendelige enn andre. Tekno-økonomiske og (innledende-) mulighetsstudier vil gi klarhet i system- og prosjektkravene, anvendeligheten og gjennomførbarheten. Disse studiene vurderer geologiske, (geo-) tekniske, økonomiske, miljømessige, juridiske og andre aspekter langs verdikjede og over de ulike fasene av et mineralprosjekt.

Optimale og realiserbare produksjonsrater

Systemvalg, dimensjon og design vil sterkt avhenge av den planlagte produksjonsraten. I det følgende er et produksjonsmål opp mot 1,6 millioner tørre tonn løftet malm per år antatt, men optimale eller realiserbare rater kan være betydelig lavere for et bestemt offshore-system anvendt på en bestemt type forekomst. Tallet 1,6 millioner tørre tonn brukes derfor ikke direkte, men danner en basis for de generelle vurderingene som gjøres. Optimal produksjonsrate vil være et resultat av en optimaliseringsstudie der man blant annet hensyntar forekomstegenskaper, værforhold og foretrukket brytningssystem.

Viktige faktorer for konseptvalg

Viktige faktorer ved valg av brytningssystem inkludert valg mellom system for horisontale eller vertikale utvinningskonsepter i DSM er (kun for aktiviteter på havbunnen):

- Geometrien til forekomsten og havbunnen (batymetri, skråningsvinkel),
- Volum, tonnasje (tonnasjer både av malm, grå- / sideberg og sediment),
- Malmgehalt (både uønskede og ønskede elementer)
- Avbyggingsforholdet¹⁹,
- Været (vind, bølger, ising)
- Bergmekaniske egenskaper (hardhet og styrke)
- Lokale forhold (f.eks. avstand mellom forekomstene som skal utvinnes og til havn)

Fysiske bergartsegenskaper og skjæreegenskapene (fresbarhet (cuttability), partikkelstørrelsesfordeling, partikkelform på borekasset, etc.) er avgjørende for valg, design og optimalisering av skjæreverktøyet, knusing og transportsystem. Metallgehalter og innholdet av uønskede mineraler og -elementer er viktige for den økonomiske evaluering, men de bestemmer også størrelse, dimensjon og antall innretninger og verktøy (og brytningsmetode).

Økonomiske evalueringer er prosjektbaserte, med tanke på nedetid og oppetid for systemet (tilgjengelighet av utstyr og utvinningsystem), malmkvaliteter og produksjonsrater, tidspunkt og mengde inntekter og kostnader.

Avstand mellom forekomster, hvor lang tid det tar å forberede utvinning av en gitt forekomst og avstanden til havn har innflytelse på den økonomiske gjennomførbarheten og dermed også på valg av utvinningsløsning.

Foruten de listede faktorene må miljømessige og andre aspekter vurderes; for eksempel må genereringen av partikkelskyer reduseres gjennom utstyrsdesign og etablering av gode prosedyrer for de marine operasjonene.

Horisontal kontra vertikal mineralutvinning

Det finnes som tidligere nevnt ikke noe universelt konsept for å utvinne en forekomst, siden teknologien, metoden og prosedyren er prosjekt- og områdespesifikk. Planlegging av uttaket og design spiller en viktig rolle i utvikling av en miljømessig robust-, økonomisk-, sikker- og effektiv utvinning av en forekomst. Tabell 5 oppsummerer fordeler og ulemper knyttet til horisontale og vertikale metoder.

¹⁹ Refererer til mengden avfall som må fjernes for en gitt mengde malm.

Tabell 5 Generelle fordeler og ulemper som forventes å gjelde for horisontale og vertikale metoder for utvinning.

	Fordeler	Ulemper
Vertikal mineralutvinning	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mest egnet for tykke malmer og sulfidmalmer og skorpeforekomster som ikke dekker store areal ○ Selektiv utvinning av verdifulle deler av forekomsten er mulig (blanding av kvaliteter eller kampanjedrift) ○ Mindre åpent område (dagbrudd) gjør det enklere å begrense støy og spredning av partikkelsky ○ Høye produksjonshastigheter kan oppnås på samme måte som for horisontal utvinning dersom forekomsten tillater det (tykkelse på forekomst, havbunnstopografi etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mulig nedetid på grunn av flytting av maskinen som kan påvirke behovet for mellomlagring og valg av løfteteknologi ○ Mulig dårlig ressursutnyttelse hvis et sømløst bore- og / eller utvinningsmønster ikke er mulig ○ Mulig uttynning av malmen med gråberg ○ Kan kreve utvinning av malmrester eller materiale som har falt ned i den dagbruddslignende strukturen ○ Krevende for bratt terreng (kan kreve undervannskonstruksjoner eller installasjoner) ○ Forarbeid for å klargjøre for produksjon kan være nødvendig ○ Må forvente at produksjonsraten er lav i starten, men øker etterhvert (ikke mulig med maks. produksjonsrate umiddelbart)
Horisontal mineralutvinning	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mest egnet for skorpeforekomster med stor lateral utstrekning. ○ Høye produksjonsrater mulig ○ Mer kontinuerlig måte å utvinne på med mindre produksjonsavbrudd (nedetid), for eksempel på grunn av flytting av utstyret ○ Bruk av autonome fartøy og automatiserte prosesser mulig (enklere å implementere) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Større åpent område (dagbrudd) som gjør det mer utfordrende å kontrollere og håndtere støy og partikkelsky ○ Forarbeid for å klargjøre for produksjon kan være nødvendig ○ Må forvente at produksjonsraten øker etterhvert (ikke mulig med maks produksjonsrate umiddelbart)

Man kan forvente at det vil bli utviklet nye teknologier og nytt utstyr. Leverandører vil tilpasse egne produkter til denne typen prosjekt og de ulike forekomsttypene. Forekomststørrelser er fortsatt usikre. Antar man produksjonsrater (årlig produksjon) mellom 0,7 og 1,6 Mt kan hver forekomst utvinnes i løpet av alt fra noen (få) måneder til 5-10 år. Enkeltforekomster kan forekomme i felt med flere forekomster.

Den antatt enkleste måten å drive horisontal mineralutvinning er å kutte og utvide ett eller flere hull eller hulrom på ett eller flere steder ved hjelp av hovedsakelig et type utstyr som JOGMEC har utviklet og testet eller hjelpekutteren / AC'en til Nautilus Minerals. Denne svært selektive tilnærmingen vil mest sannsynlig bli brukt på omfattende (2D-type)

skorpeforekomster med relativt tynne malmlag på opptil noen titalls centimeter, som kan nås av beltegående utstyr. Dette forutsetter relativt beskjeden helning på maks 10°; for brattere helninger kan f.eks. plattformer med ben vurderes. Gjennomføres metoden selektivt, vil det bety mye flytting av produksjonsutstyret og enten lav produksjonsrate eller relativt sett høy investering dersom man ønsker å holde produksjonsraten oppe.

I visse tilfeller (som for Solwara 1), kan det være mulig å utvinne malmen i en dagbruddslignende struktur med en eller flere benker. Utviklingen av bruddet kan sammenlignes med det som brukes i forbindelse med kontinuerlig utvinning på land. Bulk Cutteren, gir en høyere teoretisk skjærekapasitet enn hjelperkutteren, men for best å utnytte kapasiteten, må malmen være tilstrekkelig tykk, man må ha god plass og en flat arbeidsflate. Forberedende eller tilleggsarbeid inkluderer, men er ikke begrenset til, fjerning av overdekning, jevning av stedet hvor selve utvinningen skal skje, opprettelse av landingsområder, utvikling av benker, adkomst og ramper.

For visse forekomster med liten horisontal utbredelse vil man normalt foretrekke vertikale skjæresystemer. Dette krever systemer som kan flytte seg autonomt eller at de er flyttbare. Dette kan være sulfidmalmer eller skorpeforekomster på størrelse med noen få fotballbaner i muligens bratt og ulendt terreng. Vertikale verktøy kan brukes horisontalt, noe som innebærer at en grøft, et boreverktøy med stor diameter eller et annet utvinningsutstyr flyttes over et definert område av havbunnen (se Figur 31 A, B). Denne tilnærmingen kan være relevant for tykke (-ere) skorper.

For tykke sulfidmalmer forventes vertikale utvinningsteknologier å spille en mer dominerende rolle. Vertikal utvinning er egnet for forekomster med mektigheter på flere meter. Jo tykkere malmkroppen og større skjæreanordningen er, jo kortere er den ikke-produktive tiden (f.eks. flytting av utstyr) i forhold til tiden utvinningsutstyret er i drift. I motsetning til horisontal utvinning fjernes ikke nødvendigvis overdekningen. Malmen kan tynnes ut (med materiale uten eller lav økonomisk verdi) forutsatt at dypere lag kuttes og / eller overdekningen ikke fjernes før utnyttelse.

Resterende deler og materiale som har falt inn i gropen kan fjernes, muligens knuses og samles sammen med hovedverktøyet eller ved hjelp av metoder presentert i 5.1.1.

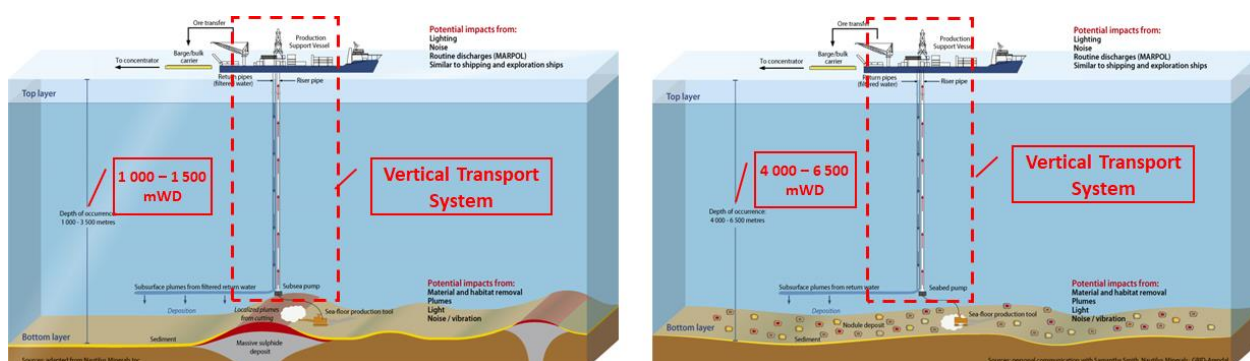
Forekomster i skrånende eller svært ujevne overflater anses vanskelig å håndtere uten bruk av spesielle havbunnskonstruksjoner. Flyttingen kan føre til betydelig nedetid med lavere eller begrenset produksjon. Avhengig av stedlige forhold og valg av utstyr, er forberedende og / eller tilleggsarbeid nødvendig som en del av hver arbeidssyklus. Eksisterende hull boret som en del av eller før utvinningen kan brukes som ankerhull for (selvflytting eller flyttbare) undervannskonstruksjoner og installasjoner.

I vertikal utvinning er det åpne området (skjæreflaten) mye mindre sammenlignet med horisontal utvinning, noe som gjør det lettere å kontrollere støy og spredning av en eventuell partikkelsky. I motsetning til ved utvinning av noder, som er en annen type mineralressurs på dyphavet, er påvirkninger fra partikkelskyer som følge av utvinningen mindre.

5.4 Vertikale transportsystemer

5.4.1 Innledning

Det vertikale transportsystemet (VTS), kan bestå av et løftesystem, et stivt stigerør, et fleksibelt rør / slange og et rør for tilbakeføring av returvann («avvannet vann») fra havbunnen til en flyttbar produksjonsstøtteenhet. Det er utviklet ulike konsepter for vertikale transportsystemer for utvinning av noder og sulfider. Noen av disse konseptene er også blitt testet i prøveanlegg eller på dyphavet, spesielt nodulene ble testet på 80-tallet. Som vist i Figur 43, er de ulike konseptene for VTS for noder eller sulfider sammenlignbare, men er noe forskjellige hovedsakelig på grunn av vann dybden og på grunn av en stedlig tilnærmet fast (sulfider) vs et bevegelig (noder) produksjonssted.



Figur 43 Illustrasjon av vertikalt transportsystem for sulfider og noder. Kilde: DSM 2014

De forskjellige VTS-konseptene kan klassifiseres som følger:

Hydraulisk løftesystem

- Mineralressursene tas opp av en oppsamlingsenhet som enten dras over havbunnen (kun for noder) eller aktivt selvgående og sendes gjennom et rør til den flytende basen (for eksempel et produksjonsstøttefartøy).
- Den vertikale transporten i stigerørsrøret drives av et system av sentrifugalpumper eller et gassløftesystem og / eller et kombinert pumpe / gassløftesystem.

Løftesystem for kontinuerlig linjebøtte (pasternosterverk)

- Mineralressursene (gjelder særlig noder) samles inn fra havbunnen av et linjebøttesystem (pasternosterverk), som drives av ett eller to fartøy, og transporteres til overflaten.

Modulært eller konteinersystem

- Mineralressursene samles inn av et autonomt undervannskjøretøy med et oppsamlingssystem (særlig for noder) som deretter løftes til overflaten ved å aktivere et oppdriftssystem. Kjøretøyet tømmer deretter oppsamlet materiale over på produksjonsstøttefartøyet før det går ned til havbunnen for neste syklus.
- Mineralressursen samles inn av egnet utstyr på havbunnen og lagres i containere som løftes til produksjonsstøttefartøyet (diskontinuerlig løfteprosess som et alternativ for pilotutvinningstester)

Når det gjelder storskala industriell bruk, er det hydrauliske løftesystemet nesten utelukkende brukt i dag. Det kontinuerlige løftesystemet for containere og det modulære systemet for vertikaltransport er beheftet med visse iboende tekniske problemer, i tillegg til en rekke grunnleggende problemer når det gjelder pålitelig drift. Dette er først og fremst relatert til problemer med intervensjon i det marine miljøet (linjebøttesystem) og kostnader (modulært system). Linjebøttesystemet har vært foreddet i mange år, mens modulsystemet nå er begrenset til noen få tilfeller.

Et typisk vertikalt transportsystem inneholder følgende delsystemer:

- Vertikalt transportsystem som et S- eller bølgeformet langt vertikalt kontinuerlig stigerør fra fartøyet til utvinningsutstyret og pumpe plassert på utstyret på havbunnen
- Stigerørsseksjoner med fleksible eller stive koblinger, med eller uten elementer som gir oppdrift
- Pumpesystemer (sentrifugalpumper for tofasert blanding av sjøvann og fragmentert malm eller bergart) integrert i flere stasjoner i det vertikale transportsystemet
- Gassløftsystem (airlift) med injeksjon av luft inn i stigerøret på to eller tre nivåer langs transportlinjen (trefaset blanding av sjøvann, fragmentert malm eller bergart og luft)
- Buffer (mellomlagring) på havbunnen for å kompensere for variasjon i produksjonen. Dette sørger for kontinuerlig innmating inn i stigerøret
- Returvannsrør til et gitt nivå nær havbunnen eller til bufferen i tilfelle det er et lukket sløyfesystem
- Flexibelt slangesystem mellom bufferen og utvinningsutstyret på havbunnen for i stor grad å frakoble bevegelsene til vertikaltransportsystemet fra bevegelsene til utvinningsutstyret
- Strøm- og datakabler integrert i stigerørsdelene og det fleksible slangesystemet

5.4.2 Sensorer, kontroll- og instrumenteringssystemer

For optimal løfteeffektivitet av slurry bestående av fragmentert malm, er det ønskelig å kontrollere optimal mineralkonsentrasjon i blandingen av vann og bergartsfragmenter. Dette er direkte relatert til kontroll av oppsamlingshastighet og mineralfordelingen på havbunnen, og tilhørende mineraltransport. Enden av stigerør eller buffer må holde seg innenfor en viss avstand fra utvinningsutstyret. Fritthengende VTS konfigurasjoner har så langt vært normen (særlig for noder på grunn av hastigheten og det store området den trenger å dekke), men for utvinning av sulfider har frittstående alternativer blitt foreslått fordi frittstående løsninger blir stadig vanligere i utvikling av dype og ultra-dype oljefelt og fordi utvinning av sulfider vil skje innenfor et mye mer avgrenset område.

Valget av et passende vertikalt transportsystem for et kommersielt mineralprosjekt på dyphavet bestemmes i utgangspunktet av følgende aspekter:

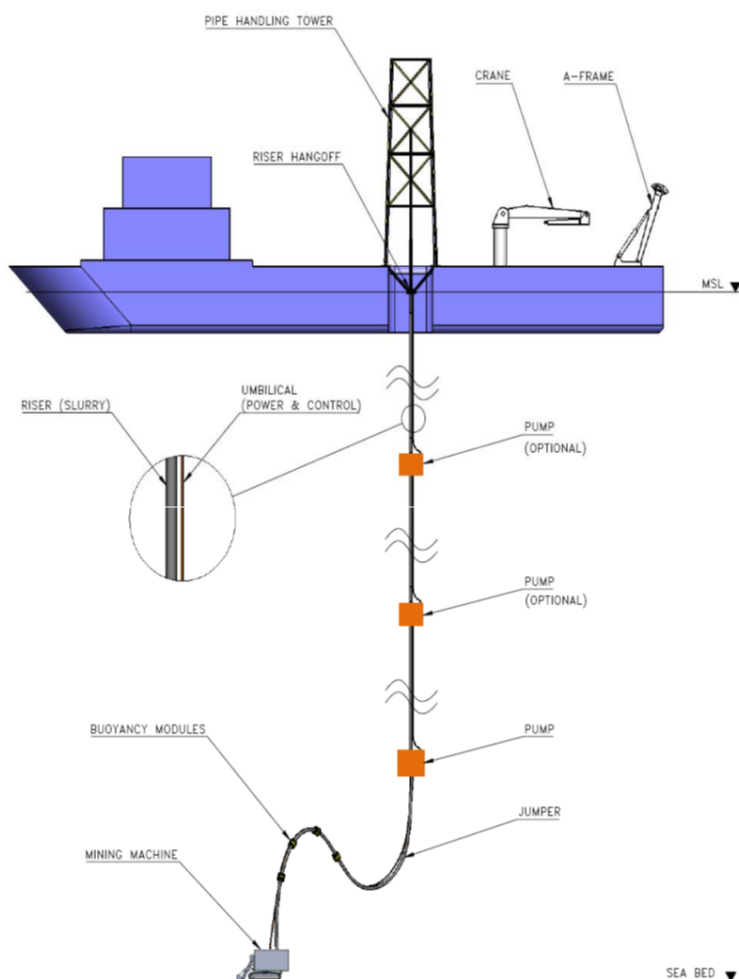
- Forekomsttype (noder / sulfider / skorper)
- Produksjonsrate (løftekapasitet for en økonomisk levedyktig drift)
- Pålitelighet (levetid for undervannskomponenter)
- Nødvendig stigerørsrørdiameter (håndtering)
- Konsekvens dersom hydrauliske feil oppstår
- Spesifikt strømforbruk (effektivitet).

5.4.3 Oversikt over teknologier for vertikal transport

Overordnet beskrivelse av det vertikale transportsystemet (VTS)

Grunnelementene i det vertikale transportsystemet (Figur 44) er i stor grad like for de tre hovedkategoriene marine mineraler.

I det følgende tas det utgangspunkt i sulfider. På overflaten inkluderer VTS alt utstyr for håndtering og lagring av stigerørsegmentene. Stigerørssystemet forbinder havbunnsverktøyet eller pumpesystemet med produksjonsfartøylene og sikrer konstant strøm av en flerfasevæske eller slurry som inneholder fragmentert malm. En del av stigerørssystemet består av pumpeteknologien. For en VTS med et hydraulisk pumpesystem kan dette være en enkelt eller flere booster-trinn langs stigerøret, samt kraftforsyning. For en VTS med gassløft kan dette inkludere en eller flere luftinjeksjons-punkter til flerfasevæsken langs stigerøret inklusiv rør for forskyning av luft. Etter separasjonen av malmfragmentene fra flerfasestrømmen på produksjonsstøttefartøyet, må det filtrerte løftevannet returneres ned for å bli sluppet ut på havbunnsnivå eller for at et lukket sløyfesystem skal brukes til å løfte slurryen igjen. Tilsvarende, dersom man bruker gassløft, kan den utseparerte luften fra flerfasevæsken brukes til å bli reinjisert inn i et lukket sløyfesystem. Avhengig av konfigurasjon og lengde på stigerør og dets operasjoner (fast / bevegelig), er posisjonerings- og dempingssystemer nødvendig for VTS. Fleksible sammenkoblingsledd og fleksible slanger forbinder stigerør- og pumpesystemet med utstyret på havbunnen. Kraft- og kommunikationskabelen for utstyret på havbunnen kan være en integrert del av VTS'en eller designet som et eget separat system.



Figur 44 Illustrasjon av vertikalt transportsystem for sulfider. Kilde: 2H Offshore.

Spesialverktøy og -metoder

Vertikale transportsystemer (VTS) vil typisk måtte designes for opptil 3500m vanddybde for sulfidmalmer og opptil 6500m vanddybde for noder. Samspillet mellom VTS og strømmene i sjøvannet kan føre til vibrasjoner i stigerøret (vortex induced vibrations), mens løfting av flerfasevæsken kan føre til aksial resonans inne i stigerøret. Fordi de aksiale resonansene fører til ekstreme belastninger kan stigerøret ryke eller man kan få tretthetsbrudd. Derfor må transportsystemet for vertikaltransport være utstyrt med systemer som reduserer aksial resonans når stigerør er i bruk og i forbindelse med utplassering / montering. Disse systemene er kjent fra boring på ultradypt vann.

5.4.4 Konsepter for vertikal transport

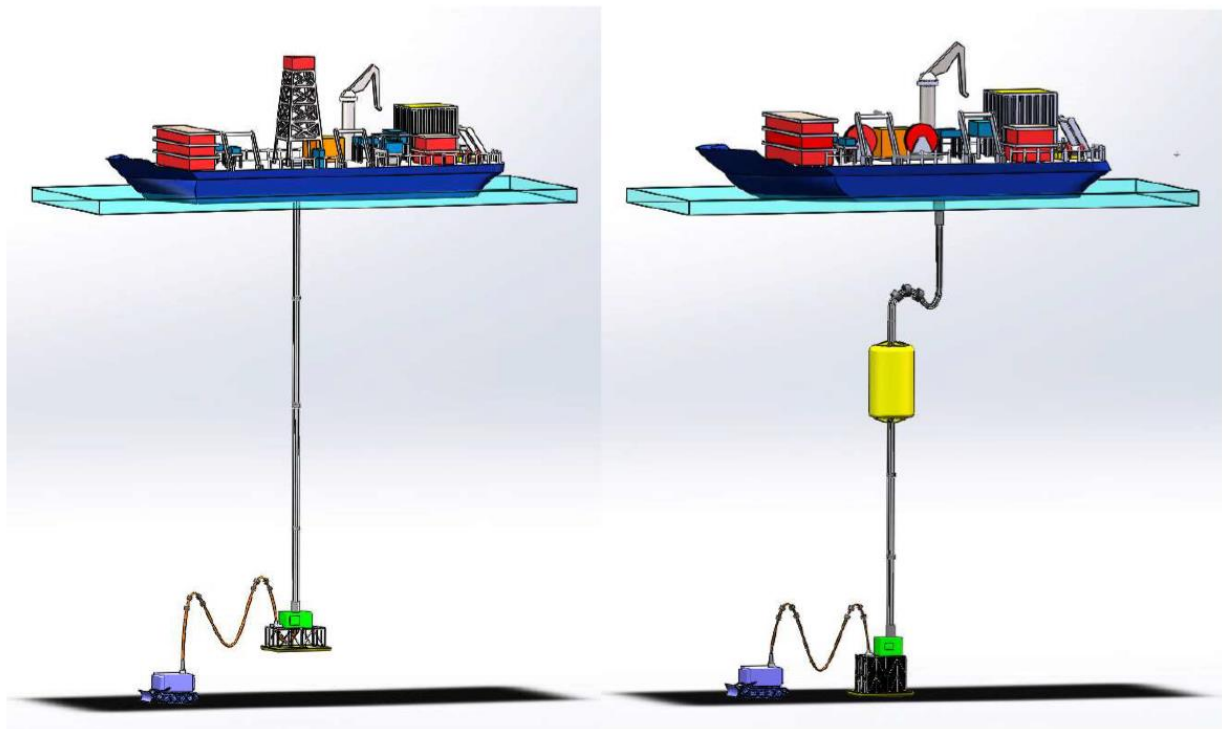
Selskaper som har publisert konsepter for vertikal transport inkluderer for eksempel TechnipFMC, Royal IHC, MHWirth / Aker Solutions, Oil States Industries og 2H Offshore. Det er ingen standard VTS-løsning tilgjengelig, som passer til all dypmarin mineralutvinning. Stigerøret er ikke en hyllevarer og er et viktig og utfordrende element i et brytningssystem. Det er i utgangspunktet tre forskjellige VTS / stigerør layouter: «wave catenary» (kontinuerlig stigerør fra fartøy til havbunnsgående brytningssystem, ev. til pumpe plassert på brytningssystemet), vertikalt hengende (segmentert stigerør med pumpe- eller boosterstasjoner langs stigerøret der pumpe og buffer henger nær havbunnen), fritt vertikalt stående (langt vertikalt stigerør med oppdriftselementer under havnivå med pumpe og buffer på havbunnen).

I offshore olje- og gass blir de stående stigerørene brukt mer og mer. De vertikalt hengende stigerørene foreslås i de fleste av konseptene for dypmarine mineralutvinning av sulfider (også for produksjonssystemet til Solwara 1). De frittstående systemene har allerede blitt brukt på 80-tallet for pilottester av noder i Clarion Clipperton Zone (CCZ). Ved utvinning av noder må VTS'en og produksjonssystemet på havbunnen følge hverandre synkront, derfor er et stående stigerør ikke effektivt.

Figur 45 illustrerer hovedtrekkene ved et vertikalt hengende og et frittstående stigerør basert på konseptuell design / layout av 2H Offshore. Disse VTS-konseptene krever også forskjellig utstyr på produksjonsstøttefartøyene. Se nedenfor for detaljer. I prinsippet er det hengende systemet fullt utstyrt med et stigerørshåndterings- og lagringssystem, mens det frittstående stigerøret kan installeres og flyttes med et eget fartøy. Det hengende stigerøret krever stor dekkplass for å lagre stigerørsleddene, og det tar lang tid å distribuere og hente stigerør. Sveisepunkt og punkt der stigerørselementene er koblet sammen representerer svakhetspunkt.

Innenfor EU-prosjektet BLUE MINING²⁰ fra 2014 til 2018 ble det med støtte fra det syvende rammeprogram utviklet en pålitelig vertikal transportløsning med relativt høy teknologimodenhet (TRL 6) som består av en konfigurering av stigerørs- og pumpeteknologi. Designene til transportsystemet var basert på både gassløft- og sentrifugalpumpeteknologi. Dette presenteres i det følgende sammen med andre teknologier og konsepter.

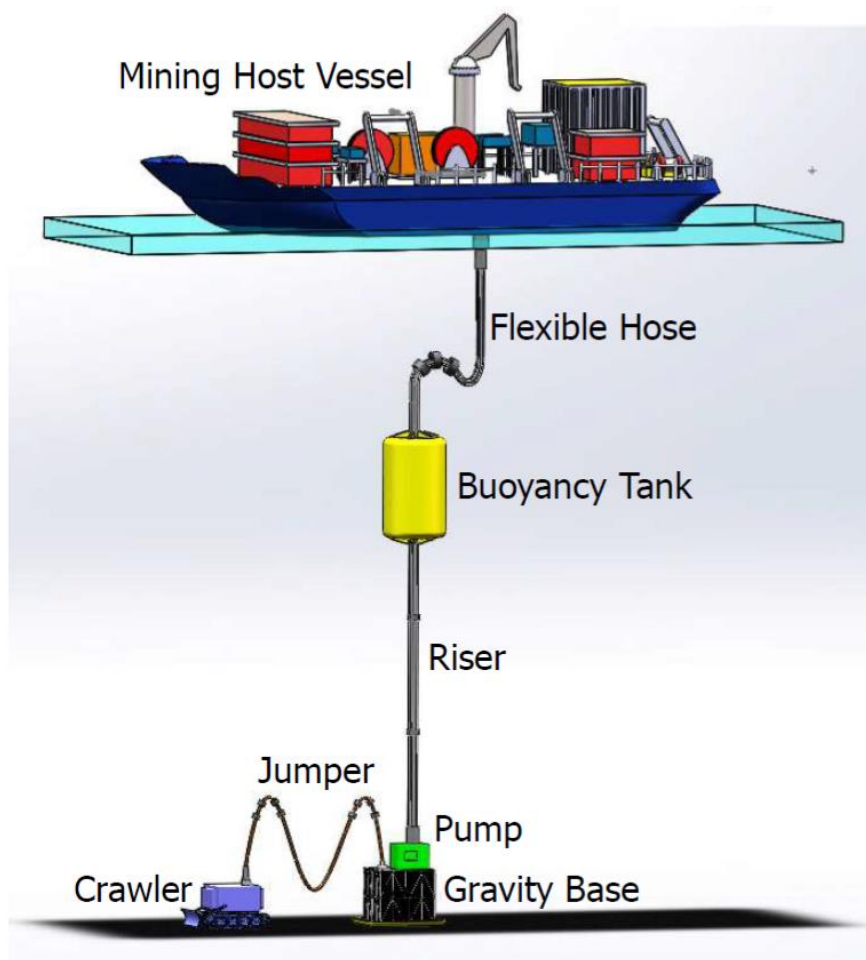
²⁰ <https://blueminig.eu/>



Figur 45 Illustrasjon av hengende (venstre) og frittstående (høyre) vertikaltransportsystem. Fokus her er å illustrere de prinsipielle forskjeller mellom de to ulike systemene. Se Figur 46 for mer detaljinformasjon om det frittstående systemet. Kilde: 2H Offshore

Som vist i Figur 45 og Figur 46 holder et anker det frittstående stigerøret til havbunnen, mens store oppdriftselementer holder stigerøret stående og en fleksibel slange forbinder stigerøret med produksjonsfartøyet. Pumpen og produksjonsutstyret på havbunnen kan kobles fra for å hentes separat opp fra havbunnen for vedlikehold. Ved pumpesvikt eller ikke planlagt stans av slurrytransporten, kan stigerøret kobles fra ved pumpen for rensk og vedlikehold. Dersom fartøyet må koble fra på grunn av dårlig vær, kan den øvre enden av slangen kobles fra fartøyet. Slangen kan markeres med og holdes opp av en bøye og hentes senere for gjenkobling.

Yamazaki et al. (2016) presenterer et konsept basert på frittstående stigerør kombinert med malmprosessering på havbunnen. Prosessering på havbunnen foreslås også av Nakajima et al. (2019).



Figur 46 Illustrasjon av et frittstående vertikalt transportsystem. Kilde: 2H Offshore

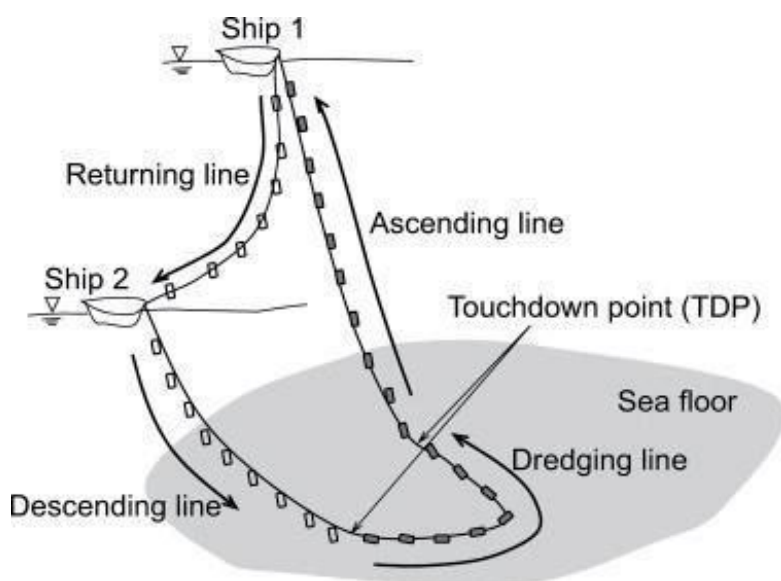
Bruker man frittstående stigerør trenger produksjonsstøttefartøyet ha egne stigerørslagrings- og installasjonssanlegg, da VTS-installasjonen typisk vil bli utført av et eget fartøy og vil bli holdt i nedsenket tilstand semi-permanent. Produksjonsstøttefartøyet er i stand til å flytte VTS'en ved hjelp av de innebygde vinsjene og derfor er det behov for minimalt med stigerørshåndtering på produksjonsstøttefartøyet. Installasjonen av frittstående VTS kan gjøres av en flyttbar offshore boreenhet eller brønnintervensjonsfartøy utstyrt med et boretårn - veldig lik offshore boring. Alternativt kan installasjon også gjøres av et rørleggerfartøy egnet for fleksible-, kompositt- og stålrør.

Det frittstående stigerøret kan også slepes fra land. Stigerøret og oppdriftselementet / -elementene blir laget på land, slept offshore og vertikalstilt og koblet til etablerte installasjoner (f.eks. pumpe). For å flytte stigerøret / riseren, har produksjonsstøttefartøyet tilstrekkelig med vinsjkapasitet til å løfte hele stigerørsenheten med pumpe. En ny forankring (gravity base i Figur 46) kan forhåndsinstalleres ved neste utvinningssted ved hjelp av et ankerhåndteringsfartøy. For denne flyttingen vil pumpen bli koblet fra forankringen og stigerør og pumpe henges under produksjonsstøttefartøyet på vinsjvaiere. Vekten fra pumpen forbedrer stabiliteten til stigerøret under transport. Stigerør og pumpe manøvreres sakte til et nytt sted, og de kobles til et nytt forankringspunkt.

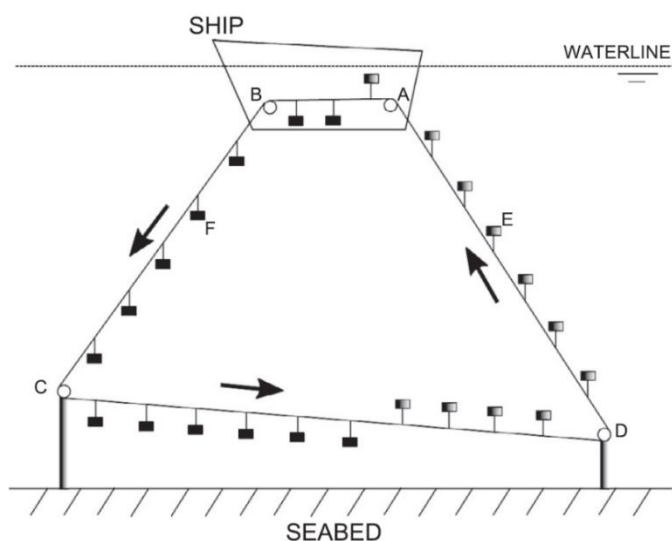
Kontinuerlig paternosterverk

Beskrivelse

Et konsept utviklet og testet for utvinning av noder er det såkalte kontinuerlig paternosterverket (continuous-line bucket system), se Figur 47. For dette systemet ble en sammenhengende vaier eller fibertau med et stort antall bøtter dratt mellom to produksjonsstøttefartøy og havbunnen. Nodulene ble mudret opp fra havbunnen og løftet med hver bølge. Dette konseptet ble testet offshore på 80-tallet, men på grunn av operasjonelle problemer ble det ikke utviklet videre. Det kontinuerlige paternosterverk gjelder i teorien for løfting av noder og er på grunn av sine grunnleggende designprinsipper ikke egnet for vertikaltransport av sulfider eller manganskorper. Dette gjelder også en variant av paternosterverk-systemet foreslått av Liao (2020) basert på oppdrift (buoyancy vertical transport system), se Figur 48.



Figur 47 Kontinuerlig paternosterverk (line-bucket system). Kilde: Nishi, 2012.



Figur 48 Vertikaltransportsystem basert på oppdrift. Liao (2020).

DSM-applikasjon

Utvinning av sulfider og av manganskorper.

Teknologimodenhet

Det har blitt testet i et driftsmiljø, men viste seg mislykket.

Teknologisk modenhetsnivå: - (teknologien fungerte ikke)

Diskontinuerlig vertikaltransport

Beskrivelse

En diskontinuerlig vertikaltransport vil være en transport av malmen fra sjøbunnen til produksjonsstøttefartøyet som skjer batchvis i form av en kurv eller konteiner. På produksjonsstøttefartøyet vil det være en vinsj som løfter og senker kurven / konteineren, se Figur 49.



Figur 49 Vinsj ombord på fartøy. Kilde: Royal IHC

DSM-applikasjon

Utvinning av sulfider og manganskorper.

Teknologimodenhet

Dette er et meget enkelt konsept sammenlignet med hydrauliske og luftløfts-systemer. Det er ikke kjent at det er testet ut for utvinning av havbunnsmineraler på store dyp, men er en kjent teknologi for heving av alt slags utstyr også fra store dyp.

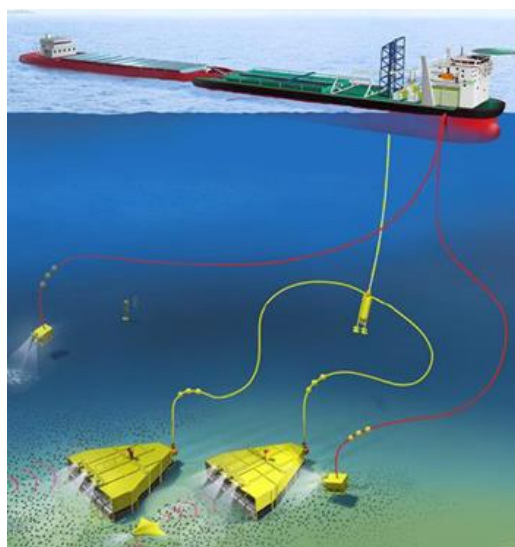
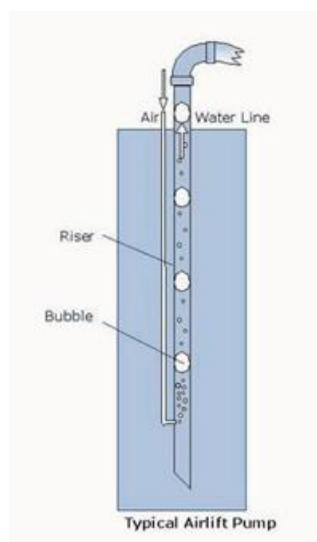
Teknologisk modenhetsnivå: 5

Gassløft og gassløftesystem

Beskrivelse

Gassløftprosessen (eng.: airlift) drives av at blandingen av luft og vann over injeksjonspunktet vil ha et økt volum sammenlignet med den tilsvarende vannsøylen. Når luften stiger gjennom hele stigerøret, fører reduksjonen av trykket til en utvidelse av luftboblene, og etterlater en mindre del av det tilgjengelige tverrsnittet for vannfasen. Når det gjelder pålitelighet, er gassløftesystemet fordelaktig, da kompressorstasjonen ligger ombord på skipet, noe som gir enkel tilgang som letter vedlikehold. De viktigste ulempene er den store nødvendige stigerør diameteren på opp til en meter

(typisk diameter rundt 350 mm) og den relativt lave effektiviteten til gassløftesystemet (se f.eks. Schulte, 2013; Knodt og Kleinen, 2012; Knodt et al. 2016). Valg av diameter er en funksjon av blant annet malmtyp, partikkelstørrelsesfordeling (som igjen er en funksjon av stedlige malmegenskaper og brytningsmetode), vanddyb, oppetid og systemets pålitlighet. Videre, på grunn av utvidelsen av trykkluften i den øvre stigerørdsdelen, må diameteren på stigerøret forstørres trinnvis. MHWirth har designet et vertikalt transportsystem for noduler. Dette ble evaluert og videreutviklet (men ikke testet) for sulfider i BlueMining-prosjektet. I dette prosjektet ble de oppnådde resultatene sammenlignet med tilgjengelige eksperimentelle resultater for gassløft fra moderate vanddyb. Rimelig samsvar ble funnet for sulfider, men avvik ble dokumentert for noduler. Ingen god forklaring på avvikene ble funnet. Svært få komponenter i det vertikale gassløftesystemet må utformes spesielt for dypmarin mineralutvinning. Kompressorer, luftslanger og injeksjonsdyser er standardkomponenter kommersielt tilgjengelige fra underleverandører.



Figur 50 Gassløftesystem. Kilde: Aker Solutions / MH Wirth²¹

DSM-applikasjon

Utvinning av sulfider, manganskorper og noduler.

Teknologimodenhet

Dette er en testet og bekreftet metode for å transportere slurry i et vertikalt stigerør. Det har blitt brukt i mudringsoperasjoner ved begrenset vanddybde og validert i forbindelse med vertikaltransport av noduler fra havdyp på 5000m i en pilottest i 80-årene. Siden den gang har teknologien blitt ytterligere forbedret av simuleringer og forskning, primært knyttet til mindre havdyp.

Teknologisk modenhetsnivå: 5

Hydraulisk pumpesystem

Beskrivelse

Royal IHC utviklet i Blue Mining prosjektet boosterstasjoner for vertikalt transportsystem basert på sentrifugalpumpeteknologi. Det består av sentrifugalpumper og spesielle undervannsmotorer for boosterstasjonene. Motoren er helt fylt, smurt og avkjølt av omkringliggende sjøvann. Boosterstasjonen består av to sentrifugalpumper og

²¹ https://fileserver.futureocean.org/forschung/r3/Dornieden_manganese_nodule_mining_concept.pdf, 26.04.21

flere ventiler, montert i en åpen ramme med standard rørseksjoner for å holde systemet enkelt og enkelt å vedlikeholde, se Figur 51.

Alle systemene i boosterstasjonen er elektriske, har sikret dobbelt redundans og med et frittstående batteridrevet system for å sikre pumping i nødssituasjoner. Boosterstasjonen har en lengde som tilsvarer lengden på en stigerørsseksjon og er koblet mellom stigerørene, ved hjelp av samme koblingsmetode som stigerørene. Avhengig av vann dybden må en rekke boosterstasjoner plasseres langs et stigerørssystem. Undersystemene til boosterstasjonen ble i Blue Mining kvalifisert på teststeder med moderat vann dybde.



Figur 51 Konsept booster stasjon for VTS, bestående av to sentrifugale mudderpumper og flere ventiler. Kilde: Royal IHC

DSM-applikasjon

Dypmarin mineralutvinning av sulfider, manganskorper og noder.

Teknologimodenhet

Det er en validert og testet metode for å transportere slurry i et vertikalt stigerør. Det har blitt brukt i mudringsoperasjoner på begrensede vanddyb og validert i transport av noder fra et havdyp på 5000m i en pilottest i 1980-årene. Hydraulikkpumpesystemet har blitt videreutviklet og kvalifisert i realistiske testmiljøer.

Teknologisk modenhetsnivå: 6

Slurrypumpe

Beskrivelse

Nautilus Minerals designet sitt vertikale transportsystem for Solwara 1 basert på bruk og / eller tilpasning av en positiv forskyvningspumpe med 10 kamre, brukt i olje- og gassindustrien for boring uten stigerør (dual gradient drilling). Pumpen ble levert av GE Hydrill, og er plassert fritt hengende på enden av stigerørssystemet og pumper slurry fra havbunnen til produksjonsstøttefartøyet. Pumpeteknologien ble opprinnelig utviklet for å pumpe boreslam. Ved å la pumpens utløpstrykk justere seg til endringer i borekasset (viskositet, tetthet og konsentrasjon av faste stoffer), imøtekommer den positive forskyvningspumpen variasjoner i strømningsforholdene og forblir innenfor spesifikasjonene til det vertikale transportsystemet.



Figur 52 Hydraulisk pumpesystem. Kilde: General Electric (2011)

DSM-applikasjon

Mineralutvinning av sulfider og manganskorper.

Teknologimodenhet

Det har vært en del av driftsplanen til Nautilus Minerals. Den første prototypen til pumpesystemet ble bygget og testet og gjennomgikk fabrikkens aksepttest. Teknologien og pumpedesignet er benyttet i olje- og gassindustrien. Det kan sees på som et eksperimentelt bevis på at konseptet fungerer.

Teknologisk modenhetsnivå: 3

5.5 Produksjonsstøttefartøy og utstyr på overflaten

5.5.1 Oversikt over teknologier

Mange av teknologiene som er testet og foreslått brukt til drift av produksjonsstøttefartøy og utplassering av utstyr er brukt av olje- og gassindustrien innen ultradypvannsboring og installasjon av produksjonssystem under vann. For de første forskningsprosjektene innen mineralutvinning på 80-tallet ble borefartøy som SECO445 bygget om etter behovene til utvinning av noder. For tiden er også det tidligere ultradypvannsborekipet Vitoria 10000 inne til ombygging slik at det kan brukes til utvinning av polymetalliske noder. En alternativ tilnærming er å bygge et spesialfartøy i henhold til spesifikasjonene til et fullt integrert brytningssystem som ble gjort av Nautilus Minerals for forekomsten Solwara 1. Spesialbygde lete- og produksjonsstøttefartøy drives av Debmarine Namibia for offshore utvinning av diamanter.

I tillegg må produksjonsstøttefartøyet ha alle muligheter til å håndtere og løfte produksjonsutstyret på havbunnen, kontrollkabelen (umbilical), et avvanningsanlegg, utstyr til mellomlagring på havbunnen, og utstyr og fasiliteter for lasting av malm til et bulkskip. Mens et fritthengende stigerør i de fleste tilfeller vil kreve et fullt integrert og spesialdesignet produksjonsstøttefartøy, se Figur 53, kan et frittstående stigerør benyttes sammen med produksjonsstøttefartøy fra den etablerte offshoreindustrien med mindre modifikasjoner, se Figur 54.



Figur 53 Illustrasjon av et fullt integrert produksjonsfartøy. Kilde: 2H Offshore



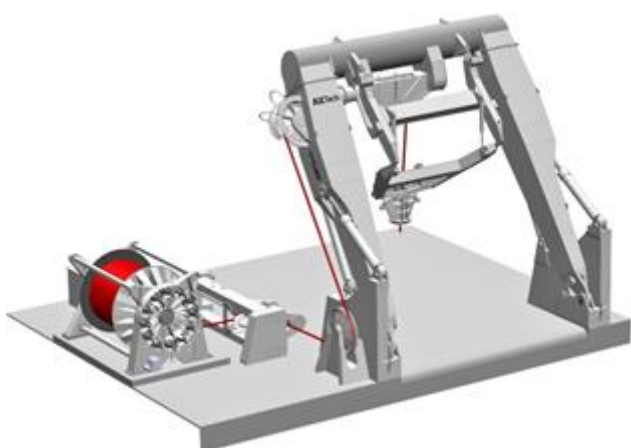
Figur 54 Illustrasjon av et standard produksjonsfartøy. Kilde: 2H Offshore

Utstyr for tunge løft og materialhåndtering

Blant selskapene som er spesialisert på tunge løft og materialhåndtering for offshoreapplikasjoner er det norske selskapet AXtech. De designer og utvikler også utstyr for utvinning av havbunnsmineraler, som for eksempel systemer for utsetting og opphenting (launch- og recovery systems (LARS)). Slikt utstyr inkluderer også dokkingutstyr, og utstyr for håndtering av vaiere og kontrollkabelen (umbilical). For verdens største offshorefartøy for utvinning av diamanter som er under bygging (AMV3) har AXTech designet LARS for en 370 tonn crawler. LARS'en vil sjøsette crawleren fra AMV3-fartøyet og senke den ned til havbunnen, samt håndtere crawlerens produksjonstigerør og kontrollkabelen. LARS'en (40m høyt tårn, og en vekt på 200 tonn) ble bygget etter spesifikasjon av BLRTs datterselskap Marketex Offshore Constructions, se Figur 55 og Figur 56.



Figur 55 LARS (Launch and Recovery System) utviklet for De Beers' diamantutvinningsfartøy AMV3. Kilde: AXtech



Figur 56 Illustrasjon av et LARS for mineralutvinning på havbunnen. Kilde: AXtech

AXtech utviklet også vinsj og hydraulisk sylinder til LARS for Nautilus Minerals, se Figur 57.



Figur 57 Vinsj og hydraulisk sylinder til LARS for Nautilus Minerals. Kilde: AXtech

Royal IHC har utviklet et dedikert utstyr for utvinning av havbunnsmineraler i form av et LARS system med stigerørssystem, lossesystem, inkludert transport av malmslurry og prosessering av avgangen. For utvinning av noder på dypt vann utviklet Royal IHC en vinsj med en bevegelig trommel og svingbar armkompensator for reduserte bøyesykluser i kontrollkabelen under løfting og senkning, og en reduksjon i akkumulert bøying under statiske operasjoner som krever hivkompensasjon, som uttrekking fra gjørmete sjøbunn, se Figur 58.



Figur 58 Illustrasjon av LARS utviklet for utvinning av havbunnsmineraler på store dyp. Kilde: Royal IHC

Håndtering av materiale og annet utstyr offshore krever kraner. For produksjonsfartøyet til Nautilus Minerals / Solwara 1 leverte det norske selskapet MacGregor to knekkbomkraner: En 200-tonns undervannskran med aktiv hivkompensasjon

(AHC) og kapasitet til å operere ned til en dybde på 2500m og en mindre 100 tonns undervannskran, se Figur 59 og Figur 60.



Figur 59 Illustrasjon av krananordning på produksjonsstøttefartøyet til Nautilus Minerals som ble designet for utvinning av sulfider. Kilde: Nautilus Minerals



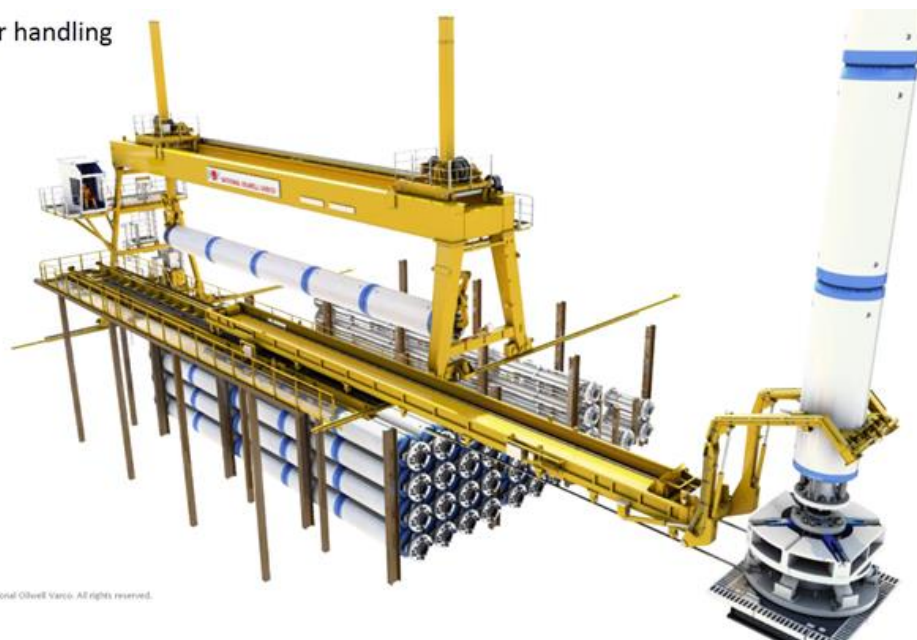
Figur 60 Produksjonsfartøyet "Nautilus New Era" under bygging²².

Håndtering av stigerør

I tilfelle det vertikale transportsystemet er designet som et fritthengende stigerør med stive stigerørselementer, må stigerøret (rør med 75' eller 95' lengde, som veier 20 til 40 tonn, sannsynligvis med flenskoblinger) håndteres med fartøy eller dedikerte portalkraner og spesialutstyr (catwalk machinery). Boretårnet inneholder et heissystem og utstyr for å begrense bevegelsen under håndtering, se Figur 61. For håndtering av stigerøret (riser hang-off) kreves en kombinasjon av lastbærende, fleksible elementer som henger opp stigerørstrengen samt ytterligere spesialutstyr. Teknologi, designkriterier og driftserfaring fra borestigerør brukt på ultradypt vann kan overføres til utvinning av havbunnsmineraler.

²² <https://dsmobserver.com/2018/08/despite-setbacks-nautilus-minerals-struggles-towards-production/>

Riser handling



Figur 61 Håndtering av stigerør og lagring av stigerør for ultradyp olje og gassboring, Kilde: NOV

For Nautilus-prosjektet ble stigerørene levert av GMC Ltd, UK. De leverer komplette nøkkelferdige stigerørspakker, inkludert stigerørslodd, oppdriftsenheter, og håndterings- og installasjonsutstyr. For Solwara 1 ble lette stigerør designet som skulle kobles til produksjonsutstyret på havbunnen. Stigerøret lagres på fartøyet og installeres ved hjelp av fartøyskranen og GMCs installasjonsverktøy. Stigerørene er spesifisert opp til vanndybde på 4000 m, skjøtelengden er 12m til 24m og tilgjengelige rørdiameterer er 8 til 20 tommer. De er laget av karbonstål (X65). Se Figur 62.



Figur 62 Stigerør for Solwara 1. Kilde: GMC

Slampumper og kompressorer

For vannsirkulasjonen i det vertikale transportsystemet kan slampumper brukes, disse er godt kjent fra bruk i offshore olje- og gassboring, se Figur 63.



Figur 63 Slanpumper for olje & gassboring. Kilde: MHWirth (venstre) / NOV (høyre)

Avvanningsanlegg

I utvinningsprosessen vil en slurry bestående av knust malm, vann og noe sediment bli pumpet opp fra havbunnen via det vertikale transportsystemet til produksjonsstøttefartøyet. Malmen vil bli sendt på transportfartøyer til land - dette krever en avvanning av slurrien om bord på produksjonsstøttefartøyet i forkant av transporten. For Nautilus Minerals og den planlagte utvinningen av sulfider ble den konseptuelle utformingen av avvanningsanlegget utført av Ausenco Minerals. Anlegget består av en dobbel sikt (screening), en sentrifuge, hydrosykloner og filtre – alt dette er kjente løsninger og velprøvd teknologi. Den detaljerte utformingen av avvanningsanlegget ble utført av DRA-gruppen basert på den spesielle erfaring de har fra sine offshore diamantgjenvinningsprosjekter utenfor Namibias kyst. Bare partikler mindre enn 8 µm er igjen i slurrien som pumpes opp fra havbunnen og vil pumpes tilbake til havbunnen eller inn i en lukket sløyfe. Selv om avvanningen av slurrien er en kjent teknologi, må plassbehovet for avvanningsanlegget inklusiv rørsystemet vurderes i forbindelse med utforming og design av produksjonsstøttefartøyet.

Lossing av utstyr og bruk av (flytende) slanger

Et alternativ for skip-til-skip-overføring av malmen fra produksjonsstøttefartøyet til et bulkfartøy for horisontal transport er å bruke flytende slanger, i likhet med konseptene som brukes for FPSO (Floating Production Storage and Offloading). Slangen blir lagret på en trommel, og den inneholder også en «trommelfortøyning» (vertical drum mooring) og en vinsj. Det er flere leverandører for slange transportsystemer, og systemene er også egnet for offshore mineralutvinning. Flytende slanger med integrert oppdrift for transport av materialer i pulverform, granulær eller halvt flytende form kan brukes som en slangeforbindelse mellom produksjonsutstyret på havbunnen og det vertikale transportsystemet og for overføring fra skip til skip, se Figur 64. Slangene kan utstyres med tilstrekkelig oppdrift for effektivt å transportere slurry med opp til en tetthet på 2,3 kg/dm³ (kilde Continental).



Figur 64 Lossekonsept basert på flytende slange. Kilde: NOV APL

6 KOMPONENTLEVERANDØRER OG INNOVASJON

6.1 Kinesiske teknologier for utvinning av havbunnsmineraler

Det er en betydelig aktivitet i Kina innen utvinning av havbunnsmineraler. Det er imidlertid vanskelig å få tak i god informasjon om de prosjekter som foregår i Kina.

I dette kapiitlet er det forsøkt å gi et innblikk i hva som er utviklet av teknologier for utvinning av havbunnsmineraler i Kina.

Det er gjort en gjennomgang av registrerte kinesiske patenter som foreligger som offentlig informasjon på nettet. I Tabell 6 er det gitt en oversikt over de kinesiske patenter som er funnet og vurdert som relevante for utvinning av mineraler i dyphavet. Patentene som presenteres og inngår i tabellen fokuserer primært på teknologier og metoder for utvinning. Ideene er sortert og tabulert i henhold til følgende kategorisering:

- Utvinningssystemer
- Produksjonsverktøy for havbunnen
- Vertikal transport
- Topside
- Leting
- Modellering og simulering

Tabell 6 Kinesiske patenter som er relevante for dypvannsutvinning.

Hva / idé	Link / patent ID
Utvinningssystemer	
Knusing av skorpe og oppsamling av integrert enhet. Et integrert system inkludert innsamling og knusing.	https://patents.google.com/patent/CN104863595B/en
Et utvinningssystem og metode inkludert innsamling, knusing og pumping	https://patents.google.com/patent/CN103628881A/en
Produksjonsverktøy for havbunnen	
Knuse skorpe ved å kombinere effekten av kutting og høytrykks vannstråle	https://patents.google.com/patent/CN101439312A/en
Samlemaskin	http://ir.idsse.ac.cn/handle/183446/7259
Mekanisme for justering av skjæredybden i forbindelse med utvinning i dyphavet	https://patents.google.com/patent/CN103352699A/en
Vertikal transport	
Hydraulisk system	https://patents.google.com/patent/CN104310065A/en

Løfting av grovpartikler med flertrinns-pumpe for slurry	https://patents.google.com/patent/CN103016362B/en
Kombinert gassløft (airlift) og hydraulisk løft	https://patents.google.com/patent/CN105775752A/en
Malmtransportsystem for utvinning på dyphavet.	https://patents.google.com/patent/CN2729158Y/en
Dyphavs mineralutvinning	https://patents.google.com/patent/CN1807836A/zh
Transportsystem	https://patents.google.com/patent/CN108194085A/en
Innsamling av mineraler og transport fra havbunnen til fartøyet	https://patents.google.com/patent/CN1065191C/en
Topside	
Utstyr og prosesser for avvanning	https://patents.google.com/patent/CN104261641B/en
Sentrifuge for avvanning	https://patents.google.com/patent/CN205079546U/en
Kraftproduksjon fra vind og bølger	https://patents.google.com/patent/CN102797617A/en
Vindkraftproduksjon på flytende plattform	https://patents.google.com/patent/CN202272153U/en
Lynavledning for plattformer for kraftproduksjon	https://patents.google.com/patent/CN105244762A/en
Leting	
Borekjøretøy / borerigg	https://patents.google.com/patent/CN102322219B/en
Modellering og simulering	
Høytrykkskammer for å simulere store dyp (1 av 2)	https://patents.google.com/patent/CN205580762U/en
Høytrykkskammer for å simulere store dyp (2 av 2)	https://patents.google.com/patent/CN103926099A/en
Høytrykkskammer for å modellere store dyp	https://patents.google.com/patent/CN101975698A/no
Apparat for å simulere selvoscillasjon i stigerør	https://patents.google.com/patent/CN102967431B/en
Apparat for å simulere vibrasjon i stigerør grunnet eksterne krefter (havstrømmer)	https://patents.google.com/patent/CN102313636A/en

Det vises også til artikkel fra Liu et al. (2016) som presenterer utviklingen av kinesisk teknologi for og utstyr for utvinning av sulfider.

6.2 Leverandører av utstyr til utvinning av havbunnsmineraler i Norge

Som en del av arbeidet med å kartlegge teknologier for utvinning av havbunnsmineraler har også de sentrale maritime klyngene i Norge, GCE Ocean Technology, GCE Node og GCE Blue Maritime vært kontaktet. De ble spurt om hvilke av deres medlemmer som de ser for seg som mulige leverandører av utstyr til utvinning av havbunnsmineraler.

I Tabell 7 er det gitt en sammenstilling av identifiserte selskaper og hva de kan levere.

Tabell 7 Oversikt over mulige leverandører av utstyr til utvinning av havbunnsmineraler i Norge (listen er ikke uttømmende).

Firma	Utstyr / Tjenester tilknyttet utvinning av havbunnsmineraler	Hjemmeside
MacGregor	MacGregor er et internasjonalt selskap som også har kontorer i Norge. Selskapet leverer bl.a. kraner til skip og plattformer. De skulle levere kraner til skipet som Nautilus Minerals skulle bruke til Solwara-prosjektet. https://gcenode.no/news/macgregor-subsea-cranes-on-mining-vessel/	www.macgregor.com
NOV	NOV (tidligere National Oilwell Varco) er et amerikansk multinasjonalt selskap, som også har kontorer i Norge. Det er en ledende verdensomspennende leverandør av utstyr og komponenter som brukes spesielt i bore- og produksjonsoperasjoner i olje- og gassindustrien. Basert på sin lange erfaring fra olje- og gassindustrien utvikler de nå også konsepter for teknologier for utvinning av havbunnsmineraler inkludert vertikale transportløsninger fra havbunn til forsyningsfartøy og utstyr til forsyningsfartøyet.	www.nov.com
Cameron	Cameron er et amerikansk selskap som også har kontorer i Norge og som er en del av Schlumbergergruppen. Cameron tilbyr bore- og produksjonssystemer for olje og gass inkludert systemer og tjenester til brønnhode, overflate- og strømningskontroll til olje-, gass- og prosessbedrifter over hele verden.	www.slb.com/companies/cameron
Future Production AS	Future Production er et norsk selskap grunnlagt 1999 som leverer skreddersydd utstyr og løsninger til offshore boring. Blant de tjenester som de leverer inngår komplette moonpool-løsninger, forskjellige type håndteringsløsninger og annet utstyr på boredekket, rørdekket og moonpool-området.	https://future-production.no/
Stimline AS	Stimline er et norsk selskap som leverer produkter til offshore olje- og gassektoren. De er spesialisert på leveranser til brønnintervensjons- og kompletteringsoperasjoner. De har bl.a. levert kveilerørsteknologi som nylig ble brukt på ODs tokt.	www.cds.as
Castor Drilling Solution AS	Castor Drilling Solution er et norsk boreutstyr og offshore ingeniørfirma grunnlagt i 2012. De leverer boreutstyr til offshore olje- og gassmarkedet med hovedvekt på nisje og skreddersydde produkter innen Heave Compensation, Tensioning, Hoisting og Handlingsystemer.	www.cds.as

Firma	Utstyr / Tjenester tilknyttet utvinning av havbunnsmineraler	Hjemmeside
Redrock AS	Redrock (Marine) er et norsk selskap som leverer løfte- og håndteringssystemer for offshore- og det maritime markedet.	www.redrock.no
Techano AS	Techano er opprinnelig et norsk selskap som i dag inngår i nederlandske Van Aalst Group B.V. Techano tilbyr avansert lasthåndterings- og løfteutstyr til offshore, maritim, fiskeri og fornybar industri.	https://techano.no
Techni AS	Techni er et norsk selskap etablert i 1997 som leverer FoU-tjenester innen mekanisk, elektronisk og industriell design sammen med produksjon. De leverer alt fra konseptstudier til hele prosessen fra idé til produksjon.	https://techni.no
Deep Ocean	DeepOcean er et norsk selskap som leverer forskjellige typer av subseautjenester som inspeksjon, vedlikehold og reparasjon. De har en omfattende flåte av fartøyer og over 50 ROVer, og en intern produksjon av diverse subseautstyr.	https://deepoceangroup.com/
ReelWell	ReelWell er et norsk selskap med hovedkontor i Stavanger som er spesialisert på offshore boreoperasjoner. De har blant annet utviklet en boremetode for å bore kompliserte og lange brønner.	https://www.reelwell.com/
Oil State Industries	Oils State Industries er et amerikansk selskap som har utviklet et stigerørsystem og pumpesystem basert på deres egen MerlingTM konnektor som skal sikre høyere oppetid. Selskapet har også kontorer og produksjon i Europa.	https://oilstates.com/
Kongsberg Maritime	Kongsberg Maritime leverte integrerte kontrollsystem til Nautilus Minerals. Rolls Royce Marine (nå Kongsberg Maritime) leverte hovedmaskiner, asimut-propeller (azimuth thrusters) og propeller innfelt i skroget (tunnel thrusters) til Nautilus Minerals.	https://www.kongsberg.com/no/maritime/contact/our-offices/norway-kongsberg-headquarters-as/ https://www.shipsrevyen.no/article/rolls-royce-motorer-til-verdens-foerste-skip-for-gruvedrift-paa-havbunnen/

7 MILJØASPEKTER

I dette kapitlet beskrives mulige miljøaspekter på havbunnen, i vannkolonnen og på havoverflaten, knyttet til dypmarin mineralutvinning. Det vil senere bli utarbeidet en egen rapport til konsekvensutredningen om miljøpåvirkninger fra utvinning av havbunnsmineraler.

Det henvises til UiB's rapport (Univ. i Bergen, in prep., 2021) for videre detaljer vedrørende miljøforhold og biodiversitet.

7.1 Miljøforhold og habitater, norske mineralforekomster

Det er store forskjeller i vanddyp og hydrografiske forhold mellom de ulike norske forekomstene av havbunnsmineraler. Variasjoner i hydrotermiske strømningsforhold medfører at også forekomstene av sulfider og manganskorper er svært forskjellige mellom de ulike stedene. Forekomstene ligger på 140 til over 3000 meters dyp: 140 meters dyp rundt forekomsten Syv søstre vest for Jan Mayen, 550-700 meters dyp langs Jan Mayen-ryggen, 2000-3300 meter dyp nordover langs Mohnsryggen og Knipovichryggen. Forekomstene som ligger i vannmasser dypere enn 600 meter holder temperaturer lavere enn 0° C, mens de grunnere farvannene ved Jan Mayen ryggen domineres av varmere vannmasser (Svavarsson et al., 1990).

Områder av interesse for utvinningsaktiviteter kan inndeles i aktive og inaktive sulfidskorsteiner og manganskorper, og støtter ulike former for biodiversitet og habitattyper. For aktive systemer inndeles de gjerne i høy-temperatur systemer (Black smokers) som Lokeslottet og lav-temperatur systemer (White smokers) som ved Jan Mayen området. De aktive områdene gir opphav til kjemosyntetisk primærproduksjon (plantevekst som er drevet av energien fra oksidasjon av kjemiske forbindelser) og det finnes flere eksempler på arter som kun lever på disse områdene (endemiske arter). I områder med inaktive skorsteiner er det generelt forventet å finne lavere biodiversitet og mindre spesialisert fauna enn i aktive områder. Det samme gjelder manganskorper, som trolig vil ha mindre variasjon i tilgjengelige habitattyper, men vil representere et hardbunnssubstrat på havbunnen og huse mange av de artene man ellers finner på hardbunns habitater på norsk sokkel.

Artsdatabanken sammenfatter informasjon om arter og naturtyper og utreder hvorvidt en art eller naturtype ansees som utrydningstruet eller ikke. Dette publiseres i norsk rødliste for arter (ny utgave november 2021, utkast ute på høring) og norsk rødliste for naturtyper (siste utgave 2018 fra Artsdatabanken, oppdateres 2025).

7.1.1 Miljøpåvirkning ved utforskning (leting)

Det er publisert svært lite litteratur om miljøpåvirkning ved leting etter havbunnsmineraler. Generelt så vil en forvente en betydelig lavere miljøpåvirkning ved leting etter havbunnsmineraler enn fra utvinning av havbunnsmineraler. Dette henger sammen med at leteaktiviteten kun har meget lokal påvirkning og aktiviteten pågår kun over kortere tid. Som beskrevet i kapittel 4 brukes gjerne et letefartøy som er utstyrt for kartlegging av havbunnsstopografi og -strukturer og innsamling geofysiske data fra overflaten. Bl.a. kan fartøyet være utstyrt med flerstråle ekkolodd for måling av batymetri og akustisk bunnreflektivitet, side-scan sonar og CTD-måler (for målinger av hydrografi). Disse metodene medfører ikke noen fysiske inngrep på havbunnen. Slikt utstyr kan medføre noe mindre lydbelastning lokalt. Det er spesielle utfordringer med bruk av seismikk for leteaktivitet som medfører at seismikk brukes i mindre omfang, da seismiske bølger ikke er i stand til å avbilde sulfidforekomster med høy nok detaljgrad.

For fysisk prøvetaking av havbunnen vil fartøyet ha tilgang til grabbprøvetaker som kan senkes ned til havbunnen fra fartøyet, det vil kunne gi noe oppvirvling lokalt på bunnen og mindre partikkelskyer, i tillegg til direkte effekter på bunnen hvor prøven tas.

I tillegg til utstyr for fysisk prøvetaking vil letefartøyet normalt ha tilgang til en eller flere undervannsfarkoster (ROVer og / eller AUVer) som kan bære ulike instrumenter og detektorer for ulike applikasjoner ved leting etter mineraler. ROVer manøvrerer ved hjelp av thrustere det kan lokalt medføre noe oppvirvling og mindre partikkelskyer fra sedimentene på havbunnen. AUVer er glidere og benytter variabel oppdrift i stedet for thrustere og vil derfor gi meget begrenset oppvirvling.

Som en del av leteaktiviteten vil det i mange tilfeller også bli tatt kjerneprøver. Disse tas fra fartøyet (f.eks. ved kveilerørsteknologi), eller ved hjelp av undervannsfarkoster som kan bære boreutstyr, eller ved fjernstyrt borerigg som plasseres ut på sjøbunnen. Kjerneprøvetaking vil kunne medføre noe partikkelskyer i tillegg til det lokale inngrepet i sjøbunnen fra borehullet.

7.1.2 Miljøpåvirkninger fra utvinningsaktiviteter

De viktigste miljøpåvirkningene fra utvinning av mineralforekomster er forventet å opptre som følge av (Haugan et al, 2020; Howard et al., 2020):

- Direkte fjerning og ødeleggelse av substrat / habitater
- Endringer i geokjemiske og fysiske egenskaper til havbunnen
- Partikkelskyer og oppvirvling av sedimenter
- Utslipp av forurensningsstoffer og endring av de fysiske egenskaper til vannmassene
- Støy, vibrasjoner og lys

I tillegg forventes utslipp til luft og til sjø fra fartøy (bruks- eller prosessrelaterte kjemikalier).

Siden det i svært liten grad er foretatt utvinning av havbunnsmineraler på dypere vann foreligger det begrenset med informasjon om miljøeffekter og tid det vil kunne ta for reetablering av de biologiske samfunnene. Den største utfordringen man ser for seg ved utstrakt utvinningsaktivitet av mineralforekomster på større vanddyp er lokalt tap av biodiversitet, tvungen migrering og / eller lokal utryddelse av arter (Van Dover et al. 2017; Niner et al. 2018).

Den mulige miljøpåvirkningen fra mineralutvinning på havbunnen må sees i lys av hvilke miljøforhold og habitater som eksisterer på de ulike områdene samt hvilke teknologier, prosedyrer og avbøtende tiltak som settes inn. Grad av miljøpåvirkning vil i stor grad være prosjektspesifikk.

Nedenfor er det gitt en beskrivelse og vurdering av hvordan ulike hovedaktiviteter i forbindelse med mineralutvinning vil kunne påvirke miljøet.

Direkte fjerning og ødeleggelse av substrat / habitater

Utvinning av sulfider eller manganskorper vil foregå ved mekaniske prosesser som helt eller delvis fragmenterer og fjerner ressursene som faunasamfunn lever på. Det fragmenterte materialet vil suges opp i stigerørssystemer før det avvannes på produksjonsstøttefartøy eller det vil kunne transporteres til overflate via konteiner eller ved bruk av andre metoder. Særlig vil horisontale utvinningsmetoder kunne påvirke store deler av overflatesubstratet hvor spesialiserte organismer kan ha tilhold. Organismesamfunn som lever på skorsteiner eller skorper vil bli knust eller fjernes eller deres spesialiserte nisjer vil forsvinne.

Endringer i geokjemiske og fysiske egenskaper til havbunnen

Det kan forventes at heterogene hardbunns habitater kan bli mer homogene og at det vil være færre mulige nisjer / mikrohabitater å okkupere for biologiske samfunn ved fjerning av sulfider eller manganskorper. I selve gruveområdet vil opprinnelige substrattyper og habitat bli fjernet.

Ved operasjoner som bruker større maskineri vil havbunnen generelt forstyrres.

Ved eventuell spredning av betydelige mengder partikler utenfor nærsone, kan dette påvirke levevilkårene for dyregrupper også utenfor nærsone til utvinningsaktivitetene. Ved selve utvinningen kan også metaller og sulfider fra malmen frigjøres og spres sammen med sedimentpartikler.

Deponering av eventuelle overskuddsmasser kan påvirke havbunnen der de plasseres, både negativt med tanke på direkte ødeleggelse (overdekking) av habitater, og eventuell giftighet samt utlekking fra masser, men det kan også tenkes situasjoner der overskuddsmasser vil kunne skape egnede habitater for rekolonisering av hardbunnsfauna.

Partikkelskyer og oppvirvling av sedimenter

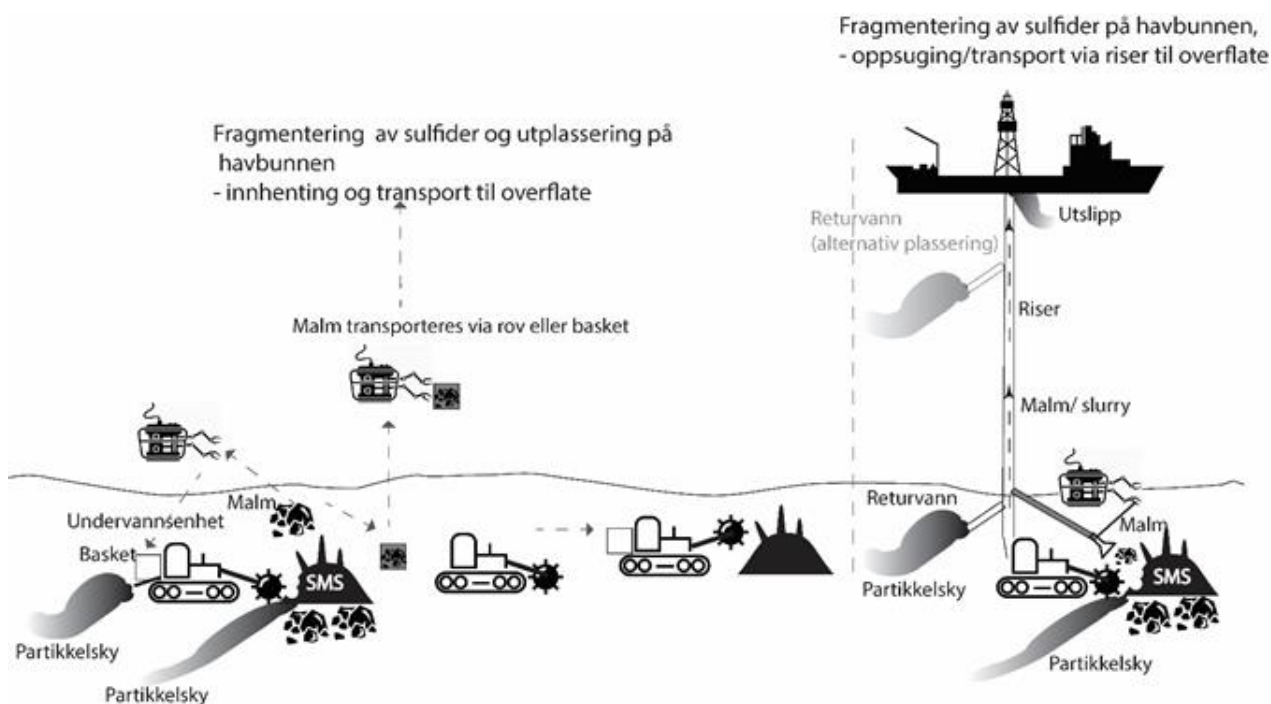
Partikkelskyer fra utvinning på havbunnen

Partikkelskyer som opptrer som følge av bevegelser til undervannsenheter og mekanisk kutting / fragmentering av sulfider og skorper, samt separasjon på havbunnen vil bestå av både grovt og fint materiale og vil kunne påvirke organismer på havbunnen. I tillegg vil det kunne være behov for fjerning av bløtt sediment som ligger over forekomster, noe som kan medføre spredning av partikler av leire blant annet omdannet fra vulkanske bergarter. Dette omtales som partikkelskyer.

Det er flere faktorer som kan påvirker spredningen av partikler:

- Mengde partikler som spres fra kilden per tidsenhet
 - Mengden vil påvirke miljøbelastningen
- Kornstørrelse
 - Kornstørrelse vil påvirke hvor langt partikler spres (synkehastighet)
- Tetthet
 - Tettheten på partiklene vil også påvirke hvor langt de spres og hvor raskt de synker
- Flokkulering
 - Partikler som flokkulerer (f.eks. leirpartikler) vil synke raskere
- Temperatur
 - Temperaturforskjeller vil kunne påvirke partiklene, men temperaturforskjeller vil normalt være små på store dyp og det forventes ikke å ha stor påvirkning
- Bunnstrøm, retning og hastighet
 - Bunnstrøm, retning og hastighet vil være bestemmende for i hvilken retning partiklene spres og hvor raskt de spres

Eksempel på mulige scenarier for utvinning og potensiale for spredning fra utvinning av sulfidforekomster er vist i Figur 65.



Figur 65 Eksempel på utvinning av sulfidforekomst på havbunnen og to alternativer for transport til produksjonsstøttefartøy. Mulige kilder til partikkelspredning er vist (merk at inntegnede partikkelskyer kun er ment som illustrasjon på kilde og ikke nødvendigvis gjenspeiler faktisk utbredelse).

Spesielt arter som filtrerer sjøvann / sedimenter og immobile arter vil kunne påvirkes negativt av partikkelskyer ved bunnen. Effekter fra helt eller delvis tildekking av sediment eller eksponering for vannmasser med forhøyede mengder partikler vil kunne gjøre seg gjeldende ved eksempelvis tilstopping av gjeller, fødeapparater, vevsdød, redusert overlevelse blant annet som følge av redusert oksygenopptak / kvelning eller indirekte som følge av redusert fødeopptak (se for eksempel Smit et al., 2008; Tjensvoll et al., 2013; Pineda et al., 2017). Erfaringer fra studier utført i forbindelse med olje- og gassaktiviteter og landbasert mineralutvinning har vist at partiklenes fysiske form og kjemiske beskaffenhet vil ha betydning for effekter, og at partikler med spisse kanter som typisk kan oppstå ved utvinning av mineraler vil kunne ha størst potensiale for negativ påvirkning (Liefmann et al., 2018). Mengde partikler i vannmassene må også sees i lys av eksponeringstider, hvor langvarig høye konsentrasjoner vil ha større effekt enn periodiske påvirkninger av partikkelskyer. Det vil også være forskjeller i effekter avhengig av organismetyper. Larvestadier av organismer er rapportert å være spesielt sårbare ovenfor partikler (se for eksempel Järngren et al., 2017; Reinardy et al. 2019).

Partikkelskyer fra returnvann

Returnvann fra avvanning av malm / slurry kan i hovedsak komme fra to typer operasjoner:

- Fra avvanning av malm som føres vertikalt opp til produksjonsstøttefartøyet via stigerør eller konteiner
- Ved skip-til-skip overføring av malm, overføringen kan sannsynligvis ikke skje med transportbånd på grunn av bølgehøyder. Derfor må lagret malm på produksjonsstøttefartøyet tilføres vann for pumping over til transportskipet, og så avvannes igjen på transportskipet. Det meste slammet er imidlertid fjernet ved første avvanning.

Returnvann vil kunne føre til partikkelskyer i vannmassene (Figur 65). Hvor i vannsøylen dette returnvannet slippes ut vil avhenge av teknologi som benyttes, og miljøstrategi som ligger til grunn, men det er forventet at utslippene vil kunne foregå nær bunnen eller i de midtre deler av vannsøylen. Preliminære tall viser at ved utvinning av noder vil returnvann

kunne slippes ut ved bunnen ved en rate på 0,3 m³/s og med en partikkelkonsentrasjon på opp imot 6000 mg/l (DNV GL, 2016). For utvinning av sulfider på norsk sokkel er det antatt at det anslagsvis vil pumpes opp 0,2-0,25 m³/s med vann / slurry til produksjonsstøttefartøyet. Nautilus minerals oppgir modellresultater som viser utslipp av returvann ved en rate på 0,25 m³/s, som slippes ut via to rør som peker oppover og vekk fra havbunnen (Gwyther et al. 2008). Tilstopping av stigerør og eventuelle utslipp i vannsøyle i forbindelse med dette kan medføre utslipp av partikler.

Pilotstudier og modelleringer av utstrekning av partikkelskyer

Så langt er alle data basert på utstrekning av partikkelskyer relatert til mineralutvinning basert på matematisk modellering. Modellering eller målinger av utstrekning av partikkelskyer fra utvinningsaktiviteter på bunnen er utført ved enkelte pilotstudier blant annet for Solwara 1 ved Papua Ny-Guinea (modellering av fjerning av ikke-konsolidert materiale før utvinning, i 2008 utført av Asia-Pacific ASA, nå RPS Group, ref. Gwyther et al., 2008), Patania II (GSR og DEME Group, og BGR- German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources i 2018), og i felttester utenfor Kanariøyene (Spearman, 2020). Resultater fra disse studiene er vist i Tabell 8, og gir en pekepinn om hva som kan forventes med tanke på partikkelspredning fra utvinningsaktiviteter. Modellresultatene antyder at en i mange tilfeller vil være tilbake til å ha bakgrunnskonsentrasjoner av partikler i vannet ca. 1 km fra kilden til spredningen. Merk at de modellerte scenariene er for utvinning av noder, og partikkelspredning vil variere fra case til case avhengig av bl.a. bunnforhold, type mineraler som utvinnes og brytningsmetode. På norsk sokkel er det kun rapportert forekomster av sulfider og skorper og utvinning av disse forventes å gi mindre spredningsvolum av partikler enn ved utvinning av noder. Ved utvinning av noder virvles det i tillegg opp de sedimentene som ligger rundt nodulene, og dette er hovedgrunnen til ulik partikkelspredning fra utvinning av noder sammenlignet med utvinning av sulfider og skorper. Det kan også nevnes at det er teknologier under utvikling for å minimere partikkelspredning ved utvinning.

Tabell 8 Modellresultater fra utvalgte studier av spredning av partikler fra pilotstudier for utvinning av havbunnsressurser.

Studie	Spredning fra ROV / utvinningsenhet på havbunnen	Spredning fra returvann fra produksjonsstøttefartøy
Solwara 1 (2008, SSFATE)	Etter 20 måneders utvinning: 0.18 mm deponering 1 km unna aktiviteter, og 500 mm på utvinningslokasjonen	Utslipp fra fartøy, etter 20 måneders utvinning: maksimalt 0,1 mm sedimentert materiale på havbunnen
Patania II (2018, IMDC, og MITgcm numerical model)	GSM/DEME modellering: 1 mm deponering i 500-750 meter avstand 0,1 mm deponering i 5 km avstand BGR modellering: Partikkelsky med høy konsentrasjon av partikler (>1 g/l) nådde maksimum 1 km fra testområde, bakgrunnskonsentrasjoner av partikler 3 km fra kilde Maksimal spredning av deponering ut til 2 km fra kilde med deponering 0,1 mm. Deponering <0,1 mm maksimalt 3,5 km (økende til 8 km ved modellert kraftig økning av strømstyrke som kan inntreffe ved økninger av bunnstrøm (som i enkelte tilfeller kan inntreffe som følge av «eddies» på dypt vann)	Etter 4 dager, spredning fra utslipp: 10 mg/l partikkelkons. ut til 1 km 1 mg/l partikkelkons. ut til 3 km 0,1 mg/l partikkelkons. ut til 5-12 km (avhengig av strømforhold)
Felttest Kanariøyene (Spearman, 2020)	Målt med AUV: Bakgrunnskonsentrasjoner (~10 µg/l), ved avstander på ca. 1 km fra området partikkelskyen ble generert	

Utslipp av forurensningsstoffer og endring av de fysiske egenskaper til vannmassene

Forurensningsstoffer i vannmassene

Utvinningsaktiviteter ved havbunnen og utslipp av returvann vil kunne medføre at partikler fra mineralene som utvinnes vil spres i spesifikke lag av vannmassene før de synker ut. Partiklene vil kunne ha høye konsentrasjoner av metaller og sulfider som vil kunne være giftige for organismer i vannmassene og på havbunnen. Metaller bundet i sulfider vil kunne bli tilgjengelige for organismer i form av ioniserte forbindelser som følge av kjemiske prosesser som potensielt finner sted ved kontakt med sjøvann (Petersen et al, 1997). Enkelte metaller er mer løselige enn andre og det kan forventes at de minste partiklene som oppholder seg lengst i vannmassene vil ha størst potensiale til å avgj giftige metallioner (Maddock et al., 2007). Erfaringer fra MIDAS prosjektet (Managing Impacts of Deep Sea Resource Exploitation) har vist at giftighetsstudier av organismer på grunt vann ikke nødvendigvis er overførbare til organismer på dypt vann.

Temperaturrendringer

De viktigste kildene til endringer i vanntemperatur ville være fra vannutslipp fra ulike prosesser på støttefartøyet. Temperaturrendringer som følge av bruk av lys eller utstyr på havbunnen ansees som små.

Det har blitt rapportert at returvann vil kunne være 2-5 °C varmere enn det omgivende vannet på utslippspunktet (ved innhøsting av noduler). Det forventes imidlertid at slike temperaturgradienter er så lave at temperaturforskjellen rask blir borte når returvannet kommer i kontakt med havvannet.

Støy, vibrasjoner og lys

Støy og vibrasjoner vil oppstå fra utstyr som opereres på og ved havbunnen, fra pumper installert langs stigerør og fra støttefartøy på overflaten. Under normal operasjon er det ikke forventet kraftige kortvarige pulser av lyd som gir varige skader på marint liv.

Støyforurensning kan forstyrre kommunikasjon til hvalarter som i all hovedsak benytter seg av akustisk kommunikasjon. Stress og skremmeeffekter kan muligens opptre hos hvaler som befinner seg i området, men siden det ikke er forventet plutselige høye lyder er trolig effektene begrenset i omfang.

Dypvannsfauna lever i områder der det ikke er naturlig lys. De fleste artene i disse miljøene har høyt spesialiserte visuelle systemer og er derfor følsomme for lysforurensning.

Andre miljøeffekter

Utslipp til luft

Utslipp til luft vil i all hovedsak kunne komme fra produksjonsstøttefartøyet og fra transportfartøyer som skal bringe malmen til land. Produksjonsstøttefartøyet vil kunne oppholde seg kontinuerlig i utvinningsområdet over lang tid (måneder / år). Spesielt utslipp fra forbrenningsmotorer kunne medføre et betydelig CO₂ utslipp, det gjelder også transportfartøyer som skal hente malm som skal fraktes til land. På grunn av de store vandypene forventes at fartøyet normalt ligger på DP og ikke er ankret.

Drivstoff til spesielt støttefartøyet vil derfor være en avgjørende faktor for utslipp til luft fra utvinningsområdet. Andre typer av drivstoff enn marin diesel vil kunne gi betydelige reduksjoner i utslipp til luft (LNG, brenselceller og batteriteknologi eller andre energikilder med lave eller ingen utslipp til luft).

Oksidativ reaksjon av sulfider i malm under transport og lagring

Under transport og lagring av malm som inneholder sulfider, vil malmen ved kontakt med oksygen fra luft kunne sette i gang en oksidativ reaksjon som danner svovelsyre. Malmen bør transporteres og lagres slik at malmen ikke kommer i kontakt med luft, eksempelvis ved å være tildekket av vann.

Utslipp av kjølevann

Utslipp av kjølevann eller prosessrelaterte kjemikalier fra produksjonsstøttefartøyet (og transportfartøyer) kan inneholde forskjellige typer kjemikalier som kan være skadelige for det marine miljøet.

7.2 Miljøpåvirkning knyttet til ressurs og utvinning av denne

Det forventes størst miljøpåvirkning med potensielt irreversible effekter hvis en utvinner aktive sulfidskorsteiner. Studier har vist at inaktive skorsteiner generelt har lavere biodiversitet og færre endemiske (stedegne) arter sammenlignet med aktive områder. Siden de varme kildenes hydrodynamiske strømninger kan variere og inaktive skorsteiner kan "våkne til liv igjen" når vannstrømning gjenoprettes er det forventet at det vil kunne være en gradient av biodiversitet bort fra spredningssoner med aktive sulfidskorsteiner (Jamieson et al., 2020). I områdene nærmest spredningssoner er sannsynlighet for at vannstrømninger føres ut av havbunnen og skaper / gjenoppretter aktive skorsteiner trolig størst.

Utvinning fra aktive systemer med svært varme hydrotermale systemer vil i tillegg være meget utfordrende på grunn av høy temperatur og lav pH (surt vann).

Ved utvinning av mineraler fra manganskorper forventes mindre miljøpåvirkning i form av risiko for lokal utryddelse av arter, og fjerning av spesialiserte nisjer, men potensielt vil større arealer påvirkes, noe som kan gi effekter på større skala.

7.3 Avbøtende tiltak

For å minimere påvirkningen på biodiversitet både i nærsone og lenger ut finnes det flere tekniske løsninger som kan tas i bruk.

- Sørg for at den tekniske planleggingen av tiltaket har som fokus å velge utstyr som gir minst mulig miljøpåvirkning. Ved for eksempel vertikal utvinning er det bedre mulighet for å kontrollere spredning av partikkelskyen.
- For noder pågår utvikling av selektiv sugeteknologi for å minimere partikkelspredning og mengde sedimenter som suges opp sammen med nodulene. Slike teknologier bør kunne videreutvikles til å minimere partikkelspredning ved utvinning av sulfider / skorper.
- Skjørt / kapper kan monteres på maskineri som opererer på bunnen for å hindre spredning av partikler og redusere fotavtrykket til nedslamming fra operasjonen og miljøeffekter som begravning av fauna som følge av dette (Van Dover et al. 2017).
- Valg av utslippspunkt og teknisk utforming av utslippsrør vil påvirke retning og potensielt nedslagsområde for partikler. Prosesser for valg av dette bør fokusere på å minimere den totale miljøbelastningen i et område.
- Vurdering av om det meste av returvann og partikler bør slippes i områder som allerede er forstyrret fra aktiviteter eller om man bør velge å spre partiklene ut over større områder, hvor effektene blir mindre, men hvor man da også påvirker områder hvor det ikke tidligere foreligger forstyrrelser.
- Rensing av returvann (for eksempel filtrering av mindre partikler).
- Justering av temperatur og / eller salinitet til returvannet, så det best passer til resipienten på returpunktet kan vurderes som andre avbøtende tiltak.

Et tiltak som ikke er teknisk er vurdering av om man i områder hvor utvinningsaktiviteter har funnet sted kan utføre habitatrestaurering for å forsøke å danne et grunnlag for reetablering av biodiversiteten som opprinnelig eksisterte, ved å gjenskape substrater som kan rekoloniseres. Eksempelvis kan dette være relevant for hydrotermale kilder med aktive sulfidskorsteiner som frigir varmt vann som er kilde til liv i disse økosystemene. Enkelte studier (for eksempel Copley et al., 1999; Nakajima et al., 2015) har vist at det kan være mulig å bore nye utgangshull / avlede vannstrøm fra områdene hvor utvinning foregår, og at det i disse nye områdene med hydrotermale strømminger over tid vil kunne utvikles nye varme kilde habitater. Varigheten av disse tiltakene er imidlertid usikre.

Et annet ikke-teknisk tiltak er å sikre at det avsettes områder som vernes og forblir urørt av utvinningsaktiviteter, dette kan bidra til å sikre konektivitet (forbindelse mellom populasjoner) og larvespredning. Dette kan for eksempel sikres ved å la en viss andel av mineralressursen stå intakt eller avse spesifikke områder som fredes for utvinningsaktiviteter (Cuvelier et al. 2018).

8 ANDRE UTFORDRINGER OG TEKNISKE TEMAER

8.1 Inspeksjon

I sitt arbeid med utarbeidelse av rammeverk for utvinning av mineraler fra havbunn i internasjonale farvann har ISA, i sine utkast til regelverk, identifisert behov for både fysiske inspeksjoner og fjernovervåking som nødvendige elementer i oppfølgingen av mineralutvinningsaktiviteten. Det antas at et tilsvarende regime for inspeksjon vil være relevant for det norske utredningsområdet. Det er imidlertid ikke ennå utarbeidet et slikt regime for utredningsområdet

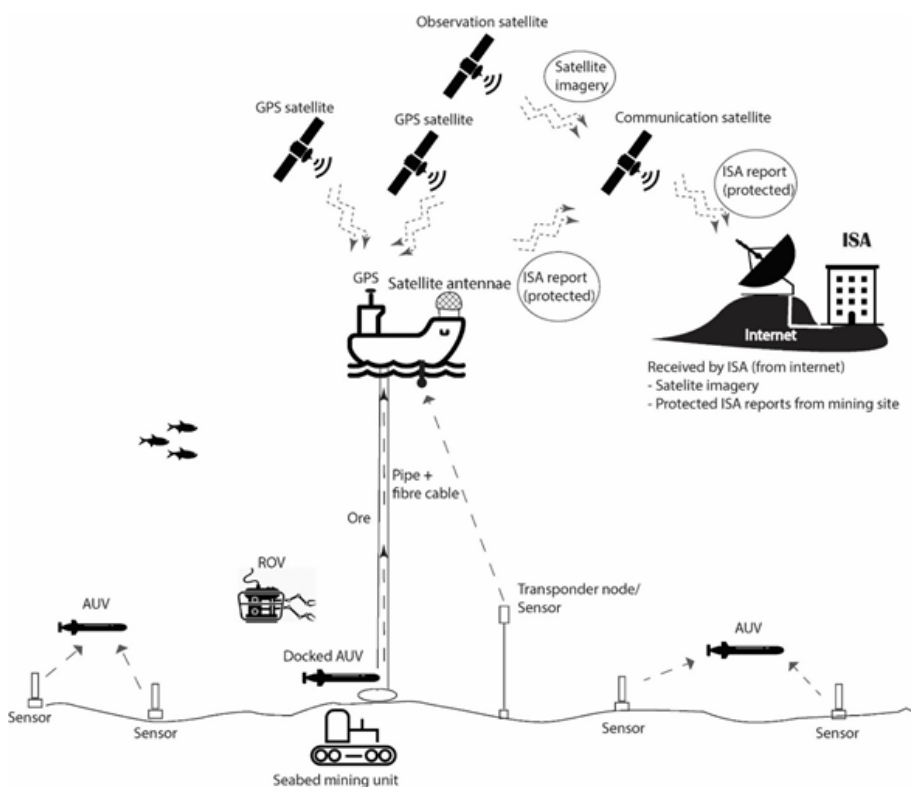
På grunn av at det til dels vil være store avstander til land fra der hvor utvinning foregår forventes at fjernovervåking vil være aktuelt. Det er nylig gitt anbefalinger til ISA av DNV hvordan dette kan utføres (rapport inntil videre ikke offentlig). I grove trekk går dette konseptet ut på at fjernovervåking settes sammen i en kombinasjon av data innhentet fra utvinningskontraktør og data innhentet fra uavhengige kilder.

Data innhentet og rapportert fra utvinningskontraktør vil i et slikt konsept samles inn fra sensorer på utvinningslokasjonen og sendes til land som en beskyttet / kryptert rapport via kommunikasjonssatellitt og internett.

Rapporteringshyppighet og innhold bør være forhåndsavtalt for å sikre effektivt og relevant tilsyn. Rapportinnhold kan forslagsvis være:

- produserte utvinningsarealer (data fra seabed mining unit),
- miljøovervåkingsinformasjon (data fra sensorer via AUV'er og transpondere),
- produksjonsdata (fra produksjonsstøttefartøyets prosessutstyr) og
- posisjon for fartøy(er) (fra fartøyenes GPS mottagere)

Det påpekes at dataintegritet og ekthet må sikres før disse sendes i krypterte rapporter.



Figur 66 Illustrasjon av infrastruktur for fjernovervåking.

Overføring av store mengder data kan være utfordrende i de nordlige delene av utredningsområdet, og kan medføre betydelige kostnader, da kommunikasjonssystemer er mindre tilgjengelig i disse områdene enn lenger sør og nærmere landbasert kommunikasjonsinfrastruktur.

Data innhentet fra uavhengige kilder vil i ett slikt konsept være posisjonsinformasjon for produksjonsstøttefartøy rapportert via eksisterende systemer som Automatic Identification System (AIS) eller Long Range Identification and Tracking (LRIT). Videre er satellittovervåking identifisert som en relevant metode der bilder og / eller bildeanalyser av utvinningsområdet er ønskelig (vist som «Observation Satellite» i Figur 66).

8.2 Nødevakuering, søk og redning

Store deler av utredningsområdet har store avstander til etablerte kapasiteter for nødevakuering av personell og søk- og redningstjeneste. Det påpekes at videreutvikling av disse tjenestene er en forutsetning for økt maritim aktivitet i disse områdene. Store avstander, mørke og utfordrende klimatiske forhold er utfordringer for etablering og videreutvikling av disse kapasitetene i utredningsområdet.

8.3 Personelltransport

Transport av personell til og fra utvinningslokasjon vil i store deler av utredningsområdet måtte foregå via sjøveien på grunn av store avstander og begrenset utbygd helikoptertransport kapasitet. Sikker sjøtransport med akseptabel regularitet vil måtte legge til grunn de klimatiske forhold og utfordringer som er beskrevet i kapitlene 2.2.2 og 2.2.3. Videre vil løsninger for sikker persontransfer (skip-skip) være av stor betydning for regulariteten. Bevegelseskompenserte gangveier kan være ett eksempel på en slik løsning, se Figur 67.



Figur 67 Bevegelseskompensert gangvei for skip-skip persontransfer. Kilde: Royal IHC.

8.4 Vedlikehold og Service

Valg av robuste tekniske løsninger tilpasset forholdene i utredningsområdet vil være av stor betydning for å opprettholde en høy regularitet i produksjonen og dermed effektiviteten i mineralutvinningen. Det vil videre være avgjørende at kritisk utstyr blir regelmessig og hensiktsmessig vedlikeholdt for å unngå unødvendig nedetid. I offshore petroleumsvirksomhet er det stort fokus på vedlikehold og ombordkapasitet til nødvendig utbedringsarbeid, både ved å sørge for betydelige delerlager, verktøy / utstyr og teknisk personell for å utføre forebyggende og utbedringsarbeid. Det er antatt at utredningsområdets beliggenhet aktualiserer behovet for ombordkapasitet for vedlikehold og utbedring minst like mye som for offshore petroleumsvirksomhet på norsk sokkel.

Som i andre virksomheter, som offshore petroleumsrelatert virksomhet, vil planlagt vedlikehold følge vedlikeholdsplaner, der tid eller brukstid for utstyr normalt er styrende for vedlikeholdsaktiviteten. Det er også naturlig at utstyrets egenrapporterte tilstand vil overvåkes for å iverksette ikke-planlagte tiltak for å forebygge eller korrigere feil. Vedlikehold og service av utstyr er antatt å være en dominerende aktivitet i offshore mineralvirksomhet, der daglig eller ukentlig vedlikehold av kutteutstyr må forventes.

De fleste vedlikeholds- og serviceaktiviteter krever direkte tilkomst for teknisk personell på produksjonsstøttefartøyet. Dette vil også normalt være den mest effektive måten å utføre slikt arbeid. Utfordringen ved vedlikehold og service av subsea utstyr er at dette må heises til overflaten og plasseres sikkert på ett arbeidsområde på fartøyet. For tungt subsea utstyr vil dette være energikrevende og stille særlige krav til systemene for å bringe slikt utstyr sikkert ombord på fartøyet i den aktuelle vær-situasjonen. Erfaringer fra offshore petroleumsvirksomhet er at slike operasjoner er værbegrenset, særlig av bølgetilstander som induserer betydelige bevegelser i produksjonsstøttefartøyet. For å redusere påvirkningen av vær og bølger har det blitt utviklet systemer for sikker utsetting og tilbakeslåing av subsea utstyr (Launch and Recovery System – LARS). Disse tar ofte i bruk vertikale skinner for å forhindre kontaktskader mellom utstyr og fartøy når operasjonen gjennomføres. Figur 68 viser en LARS løsning for tungt utvinningsutstyr.



Figur 68 IHC's LARS løsning for tungt utvinningsutstyr. Kilde: Royal IHC

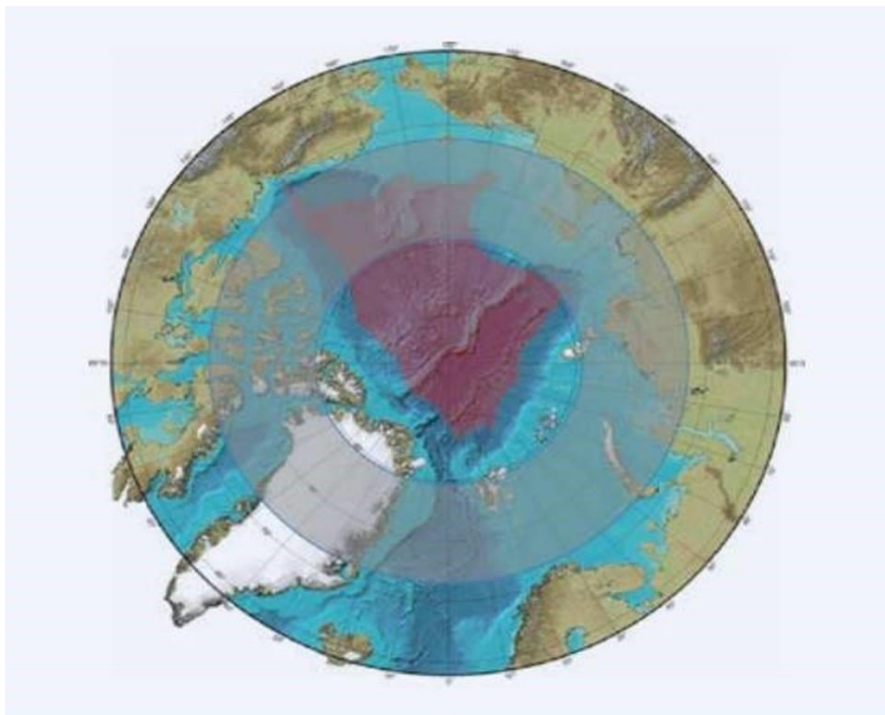
I noen tilfeller, der det er planlagt og teknisk lagt til rette for, kan vedlikehold og service kunne utføres på subsea utstyr med ROV. ROV'er av arbeidstype (WROV) vil kunne utrustes med tilpassede og fjernstyrte verktøy for å utføre arbeidet, som for eksempel å skifte ut mindre komponenter mens utstyret fortsatt befinner seg subsea.

8.5 Kommunikasjon

På grunn av store avstander fra landbasert (terrestrisk) kommunikasjonsinfrastruktur synes satellittkommunikasjon å være det eneste alternativet for bredbånd kommunikasjon i det meste av utredningsområdet. For noen landnære områder kan terrestrisk kommunikasjon benyttes til talekommunikasjon som opererer i ett lavere frekvensområde enn det som forutsettes for bredbånd kommunikasjon.

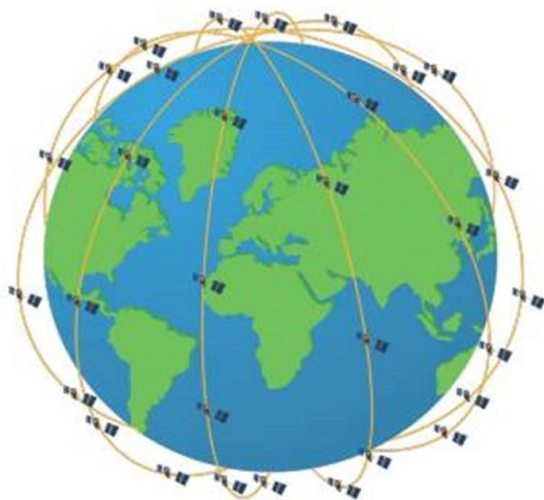
For områder sør for 72°N vil satellitter som går i bane rundt ekvator / geostasjonære (Fixed Satellite Services - FSS) gi bredbånddekning. Mellom 72°N og 78-79°N vil disse satellittene, på grunn av at de er i polar bane, gi gradvis redusert

dekning (ytelse) der ingen dekning kan forventes nord for 79°N, se Figur 69. Reduksjonsraten for høye breddegrader påvirkes også av vær og antennestørrelse.



Figur 69 Skyggelagt område mellom 72°N og 79°N der bredbåndsdekning fra geostasjonære satellitter reduseres til null. Det skraverte feltet (smultringen) er lagt på av Norsk Romsenter og gjengitt med tillatelse fra dem. Det polare bakgrunnskartet stammer fra NOAA NCEI og er gjengitt med tillatelse fra dem.

For områder lenger nord, der bredbåndsdekning ikke oppnås fra geostasjonære satellitter, vil bredbåndsdekning kunne oppnås ved bruk av lavbane (Low Earth Orbit- LEO) (se Figur 70) satellitt systemer eller satellitter i svært elliptiske baner (Highly Elliptical Orbit – HEO). Disse er mindre utbygde tjenester enn FSS og vil ventelig assosieres med høyere kostnad.



Figur 70 Iridiums LEO satellitt konfigurasjon.

9 AVSLUTNING AV VIRKSOMHET – AVSLUTNINGSPLAN

Avslutning av virksomheten skjer når utvinning og produksjon av havbunnsmineraler på et felt på den norske sokkelen skal opphøre permanent. Avslutning er regulert i den norske havbunnsmineralloven som kom i 2019.

Loven slår fast at rettighetshaver har plikt til opprydding når virksomheten avsluttes.

En avslutningsplan skal normalt foreligge senest to år før utvinning avsluttes, eller bruken av en innretning opphører. Planen skal inneholde en beskrivelse av avslutningen, en konsekvensutredning og de opplysningene og vurderingene som anses nødvendige for å fatte vedtak om avslutning. Mer detaljerte krav enn dette for avslutning av utvinning av havbunnsmineraler finnes ikke i det norske lovverket så langt.

Parallelt arbeider ISA med sin forskrift for utvinning av havbunnsmineraler (*Draft Regulations on Exploitation of Mineral Resources*). I utkastet til avslutningsplan (Closure plan) i Regulation 56 sier ISA at avslutningsplanen skal leveres senest 12 måneder for utvinning avsluttes. Annex VIII inneholder kravene til innhold i avslutningsplanen. Den skal bl.a. inneholde følgende:

- en tidsplan for avslutningen
- en vurdering av miljøpåvirkningene av tiltakene som skal iverksettes ved avslutningen
- en plan for miljøovervåking under og etter avslutningen
- en plan for avbøtende tiltak mot negative resteffekter på miljøet

Avslutningsplan for landbasert mineralutvinning er beskrevet i relevant lovverk og i driftsplanveilederen, DirMin, 2016. Planen skal som også beskrevet over, inneholde en beskrivelse av avslutningen, en konsekvensutredning og opplysninger og vurderinger som anses nødvendige for å fatte vedtak etter mineralloven (for landbasert industri).

Som nevnt over er det fortsatt uklart hvordan de detaljerte kravene vil være til en avslutningsplan etter utvinning av havbunnsmineraler på den norske sokkelen.

Av OSPAR regelverk (98/3) følger imidlertid at det må foretas fjerning av alt utstyr på havbunnen for mulig gjenbruk og eventuell avhending.

Hvordan eventuelle utbedringstiltak av en utvinningslokalitet skal foregå må adresseres av fremtidige tillatelser med vilkår. Utbedringstiltak kan for eksempel være gjenoppretting av habitatsbestanden i området. Dette er imidlertid svært vanskelig, og det må forskes mer på dette før en kan fastslå om dette er mulig og hensiktsmessig.

Det foreligger så langt ingen forskning som tilsier at utbedring / gjenoppretting av områder etter utvinning av sulfider og områder etter utvinning av manganskorper vil være forskjellig. Den store forskjellen ligger i selve fotavtrykket til utvinningen hvor utvinning av 2 millioner tonn sulfider har et fotavtrykk på i størrelsesorden $<0,2 \text{ km}^2$ og utvinning av tilsvarende mengde manganskorper har et fotavtrykk på i størrelsesorden 25 km^2 (Petersen et al., 2016).

Da det ikke er gjennomført noen fullskala utvinning av havbunnsmineraler så langt så finnes det heller ikke mange avslutningsplaner. Nautilus Minerals utarbeidet imidlertid en avslutningsplan for Solwara 1 prosjektet (Gwyther og Wright, 2008). Siden det her er snakk om delvis aktive felt, anser de det som sannsynlig at økosystemene vil komme tilbake etter avslutning. Alt av utstyr ble planlagt flyttet og brukt på andre forekomster. Fasiliteter på land var planlagt solgt eller brukt på nytt andre steder.

10 OPPSUMMERING

Mineralleting på havbunnen har spesielle utfordringer sammenlignet med leting på land, fordi en ikke enkelt og kostnadseffektivt kan bevege seg ned på de store havdypene (opp til 4000-6000m) hvor havbunnsmineralene finnes i verdenshavene.

Leteaktivitet både globalt og nasjonalt, har søkelys på noder, og sulfider og skorper har lavere prioritet. Samtidig er det ikke regnet som sannsynlig å finne noder innenfor utredningsområdet.

Innenfor utredningsområdet langs Mohnsryggen og Knipovichryggen, er det hovedsakelig sulfidforekomster det vil være naturlig å lete etter. Avhengig av fastsatte rammebetingelser, vil leting kunne inkludere aktive og inaktive sulfidforekomster langs ryggen. Det vil antakelig, med tiden, kunne bli aktuelt å lete utenfor den sentrale spredningssonen etter inaktive forekomster som med havbunnsspredningen har beveget seg vekk fra selve ryggen. Disse kan være dekket av sedimenter av varierende tykkelse.

På Vøringplataet og utstikkeren mot Jan Mayen i tillegg til dyphavsområdene innenfor utredningsområdet, finnes manganskorpe på bart fjell på undersjøiske rygger og fjellformasjoner. Manganskorpen er avsatt på bart fjell over millioner av år og kan være inntil 20-talls cm tykk.

Mineralleting i utredningsområdet har pågått siden tidlig på 2000-tallet. Aktivitetene startet med forskningstokt utført av Universitetet i Bergen i 1998, som førte til oppdagelsen av en rekke hydrotermale systemer. OD har gjennomført egne årlige tokt siden 2018 for å kartlegge mineralforekomster i dyphavet på norsk kontinentalsokkel. I tillegg har OD også deltatt på flere vitenskapelige samarbeidstokt de siste årene med Universitetet i Bergen og Universitetet i Tromsø. Det er også utført andre tokt av NTNU (MarMine) i 2016 og av Geomar (Tyskland) i 2019.

Gjennomgangen av utvinningsløsninger for havbunnsmineraler viser at det finnes en rekke teknologier under utvikling som vil kunne være aktuelle for utredningsområdet.

Hvis en ser på teknologiutviklingen på verdensbasis så er en kommet lengst med utvinningsløsninger for noder. Her er det utført flere pilottester med innsamling av noder på til dels store havdyp, f.eks. Patania II som nylig (april / mai 2021) samlet inn noder på 4500 m vandyp i Clarion Clipperton Zone (CCZ) i Stillehavet. For utvinning av sulfider og manganskorper, som er aktuelt for utredningsområdet, foreligger det mindre erfaringer da dette i mindre grad har vært prioritert.

Utvinning av sulfider og manganskorper har mange likheter med utvinning av noder og dette gjelder spesielt den vertikale transporten av malmen fra havbunnen til produksjonsstøttefartøyet og hvordan selve produksjonsstøttefartøyet er utstyrt. Den største forskjellen ligger i utstyret for innsamlingen av malmen på havbunnen; for nodulene som ligger løst i overflatesedimentene, som opp til knyttnevestore «poteter», så har det vært utviklet forskjellige typer av beltegående utstyr som kan samle inn nodulene; sulfider og manganskorper må fjernes fysisk, fortrinnsvis med noen type av skjærende verktøy før de kan transporteres opp til overflaten.

- For utvinning av sulfider vil både vertikale og horisontale utvinningsteknologier være aktuelle. Her har man utstyr hvor man borer, skjærer og knuser på ulike måter. Det finnes en rekke konsepter:
 - Forekomster kan utvinnes med grøftekuttere eller borestrenger med stor diameter som er montert på selvgående havbunnskonstruksjoner.
 - Alternativt kan det brukes et skjæreverktøy med en diameter som er mindre enn hullet som skal utvinnes. Skjæreverktøyet kan flyttes slik at skjæreflaten utvides og dermed gjøres hullet kontinuerlig større.
 - Det er også muligheter for å koble til enheter som knuser malmen på sjøbunnen slik at den lettere kan pumpes opp til overflaten via et stigerør.

Valget av teknologi for utvinning av sulfider vil bl.a. avhenge av geometri og kvalitet på sulfidforekomsten (utbredelse, dybde, gehalt) og behov for knusing og av type vertikaltransport til overflaten.

- For utvinning av manganskorper vil horisontale utvinningskonsepter være (mest) aktuelle. Her bryter / skjærer man skorpen og kanskje noe av det underliggende substratet samt eventuelle sedimenter. De fleste av de kjente horisontale konseptene benytter ett eller flere beltegående utstyr.
 - Det finnes en rekke konsepter med beltegående utstyr med forskjellige typer roterende kutterhoder for utvinning av skorper. Utstyret ligner på det som brukes til mudring i harde masser / stein.
 - Et annet konsept for skorpeutvinning er basert på en vannjet og en vibrator for å knuse skorpen i fragmenter som er små nok til å samles og transporteres til løftesystemet.
 - Som nevnt over finnes det også konsepter der vertikale verktøy brukes for skorper. Denne tilnærmingen kan spesielt være relevant for tykkere skorper.

Valget av teknologi for utvinning av manganskorper vil bl.a. avhenge av arealet som skal utvinnes. I mange tilfeller er det betydelige areal, men en begrenset tykkelse på skorpen. Det krever utstyr som lett kan forflytte seg over større areal. Er skorpen litt tykkere kan som nevnt også vertikale utvinningskonsepter være aktuelle. Bratt terreng kan også være en utfordring som setter klare krav til den foretrukne løsningen.

De forskjellige utvinningsløsningene som er beskrevet har vært vurdert med henblikk på teknologisk modenhetsnivå (TRL). De scorer generelt forholdsvis lavt, og det henger sammen med at de i hovedsak fortsatt er på konsept- eller laboratorietestnivå. Det er viktig å understreke at teknologiene er vurdert med henblikk på utvinning av havbunnsmineraler, imidlertid bygger mange av de beskrevne teknologiene på svært lignende utstyr som i dag brukes innen offshore olje og gass. En kan derfor alternativt argumentere for at mange av teknologiene skulle ha hatt en høyere TRL fordi lignende løsninger allerede finnes innen denne sektoren. Det forventes imidlertid at den eksisterende kunnskapen vil være til stor hjelp ved operasjonalisering av utvinning av havbunnsmineraler innenfor utredningsområdet. Det antas å medføre at en på relativt kort tid vil klare å tilpasse og videreutvikle mange av de eksisterende teknologiene fra spesielt olje og gass til utvinning av havbunnsmineraler.

Det er interessant å merke seg at det finnes en rekke norske teknologiløsninger / konsepter som er interessante, to eksempler er:

- Norske selskaper er kommet langt i utviklingen av ROVer og AUVer som kan utføre en rekke operasjoner på havbunnen. De vil kunne modifiseres slik at de kan brukes i forskjellige operasjoner tilknyttet utvinning av sulfider og manganskorper.
- Norske selskaper er langt fremme innen skipsteknologi basert på lave eller ingen CO₂ utslipp til atmosfæren, bl.a. ved bruk av LNG, batterier eller hybridløsninger istedenfor marin diesel. Dette har stor betydning for utslipp fra utvinning av havbunnsmineraler hvor produksjonsstøttefartøyet vil kunne være kontinuerlig på utvinningsstedet over lang tid (måneder / år).

Det forventes at de utvinningsteknologiene som beskrives i rapporten ikke vil være nøyaktig de som endelig vil bli brukt ved en eventuell fremtidig mineralutvinning. Dette begrunnes med at det forventes å skje en ytterligere teknologitvilling mot enda mer tilpasset utstyr for mineralutvinning og med fokus på å minimere miljøpåvirkningene.

Hvis man ser på viktige ytre faktorer hvor mineralutvinning innenfor utredningsområdet vil skille seg ut i forhold til tilsvarende aktivitet i andre områder så er det spesielt med tanke på vær og isforhold:

- Værforholdene er «barskere» enn mange andre steder i verden; i området ved Mohnsryggen hvor det er funnet forekomster av både sulfider og manganskorper og den mest sannsynlige bølgehøyden er mellom 0,75 – 1,5 meter (signifikant bølgehøyde for 3-timersregistreringer). Det er bølgehøyder som ville ha ført til nærmest 100 % nedetid 3 måneder i året og også stor nedetid resten av året hvis man for eksempel hadde brukt den foreslåtte

vertikaltransportløsningen fra Nautilus Minerals for Solwara 1 innenfor utredningsområdet for å frakte malmen opp fra havbunnen til fartøyet. Dette understreker behovet for spesialtilpassede løsninger.

- Marin ising, sjøis og isfjell er et problem i de nordlige delene av utredningsområdet. Med henblikk på marin ising så kan det være en isingsrate på opptil 10 cm/time om vinteren (høyest i januar). Hvis fartøyet blir sterkt nediset kan det i verste fall utgjøre en fare for stabiliteten og integriteten av fartøyet. Det kan derfor være hensiktsmessig at der hvor marin ising kan være et problem å hensynta dette ved å bruke designløsninger for å motvirke ising. En må også påregne at det kan være sjøis i de nordlige delene av utredningsområdet, sjøis vil kunne representere en utfordring for et fartøys evne til å holde posisjon eller anlagt kurs. Mulighet for isfjell og kollisjon med fartøy kan heller ikke neglisjeres i utredningsområdet.

Disse ytre faktorene setter krav til utstyr til mineralutvinning på den norske kontinentalsokkelen og da spesielt til produksjonsstøttefartøyet og tilkobling til vertikale transportløsninger for malmen fra sjøbunnen. Det kan være aktuelt å bruke regelverk for dette som for eksempel klasseselskapenes isklasse og IMO's polarkode for fartøyer.

En meget viktig problemstilling er hvilke miljøaspekter som er knyttet til påvirkningen fra utvinning av havbunnsmineraler i utredningsområdet. De viktigste miljøpåvirkningene fra utvinning av mineralforekomster er forventet å opptre som følge av:

- Direkte fjerning og ødeleggelse av substrat / habitater
- Endringer i geokjemiske og fysiske egenskaper til havbunnen
- Partikkelskyer og oppvirvling av sedimenter
- Utslipp av forurensningsstoffer og endring av de fysiske egenskaper til vannmassene
- Støy, vibrasjoner og lys

I tillegg forventes utslipp til luft og til sjø fra fartøy (bruks- eller prosessrelaterte kjemikalier).

Miljøpåvirkningen ved leting forventes å ha en betydelig lavere påvirkning enn fra utvinning av havbunnsmineraler. Dette henger sammen med at leteaktiviteten kun har meget lokal påvirkning og aktiviteten pågår over kortere tid.

Det finnes flere tekniske løsninger for å minimere påvirkningen fra utvinning av mineraler på havbunnen:

- Velge utstyr som gir minst mulig miljøpåvirkning
- Utvikling av selektiv sugeteknologi for å minimere partikkelspredning og mengde sedimenter som suges opp
- Skjørt / kapper kan monteres på maskineri som opererer på bunnen som hindre spredning av partikler og reduserer fotavtrykket og miljøeffektene
- Valg av utslippspunkt og teknisk utforming av utslippsrør vil påvirke retning og potensielt nedslagsområde for partikler
- Vurdering av hvor returvann og partikler bør slippes for at miljøeffektene skal bli mindre
- Rensing av returvann
- Justering av temperatur og / eller salinitet til returvannet

Det finnes også ikke-tekniske avbøtende tiltak som habitatrestaurering, hvor man forsøker å danne et grunnlag for reetablering av biodiversiteten som opprinnelig eksisterte, ved å gjenskape substrater som kan rekoloniseres. Et annet ikke-teknisk tiltak er å sikre at det avsettes områder som vernes og forblir urørt av utvinningsaktiviteter.

På grunn av at mineralutvinningen normalt vil foregå langt fra land så vil det være ekstra utfordringer knyttet til logistikk (forsyninger, mannskapsbytter) og eventuell nødevakuering, søk og redning.



Fysiske inspeksjoner vil være krevende og det vil derfor være relevant å basere en stor del av dette på fjernovervåking hvor data innsamles fra sensorer på havbunnen og på fartøyet og sendes via kommunikasjonssatellitter til land. Det er imidlertid gradvis mindre dekning for satellittkommunikasjon når en kommer lenger nord på grunn av at satellittene er i polar bane. Videre vil en kunne bruke overvåkingsatellitter til å visuelt følge med på hva som skjer på utvinningslokaliteten.

Annen virksomhet i utredningsområdet vil bli nærmere adressert i andre studier som del av konsekvensutredningen.

11 REFERANSER

Alvarez Grima, M., Miedema, S.A., van de Ketterij, R.G., Yenigül, N.B., van Rhee, C., 2015. Effect of high hyperbaric pressure on rock cutting process. *Engineering Geology* 196, 24–36.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.016>

Artsdatabanken, 2018. Norsk rødliste for naturtyper. <https://www.artsdatabanken.no/rodlisefornaturtyper>

BarentsWatch, 2018. Mineraljakt på havets bunn. <https://www.barentswatch.no/artikler/mineraljakt-pa-havets-bunn/>

BGR, 2018. Environmental Impact Assessment for the testing of a pre-prototype manganese nodule collector vehicle in the Eastern German license area (Clarion-Clipperton Zone) in the framework of the European JPI-O MiningImpact 2 research project.

Boyd, R., Bjerkgård, T., Nordahl, B., Schiellerup, H. (Eds.), 2016. Mineral Resources in the Arctic, Geological Survey of Norway Special Publication. Geological Survey of Norway, Trondheim.

Chung, J.S., Tsurusaki, K., 1994. Advance in Deep-Ocean Mining Systems Research. Presented at the The Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan, p. 14.

Chung, J.S., 1996. Deep-Ocean Mining: Technologies For Manganese Nodules And Crusts. *International Journal of Offshore and Polar Engineering* 6.

Copley, J. T. P., Tyler, P. A., Van Dover, C. L., Schultz, A., Dickson, P., and Singh, S. (1999). Subannual temporal variation in faunal distributions at the TAG hydrothermal mound (26 N, Mid-Atlantic Ridge). *Mar. Ecol.* 20, 291–306. doi: 10.1046/j.1439-0485.1999.2034076.x

Corliss, J.B., Dymond, J., Gordon, L.I., Edmond, J.M., von Herzen, R.P., Ballard, R.D., Green, K., Williams, D., Bainbridge, A., Crane, K., van Andel, T.H., 1979. Submarine Thermal Springs on the Galápagos Rift. *Science* 203, 1073–1083. <https://doi.org/10.1126/science.203.4385.1073>

Cuvelier, Daphne, Sabine Gollner, Daniel O.B. Jones, Stefanie Kaiser, Pedro Martínez Arbizu, Lena Menzel, Nélia C. Mestre et al. 2018. "Potential Mitigation and Restoration Actions in Ecosystems Impacted by Seabed Mining." *Frontiers in Marine Science* 5.

de Sá, V.R., Koike, K., Goto, T., Nozaki, T., Takaya, Y., Yamasaki, T., 2021. 3D Geostatistical Modeling of Metal Contents and Lithofacies for Mineralization Mechanism Determination of a Seafloor Hydrothermal Deposit in the Middle Okinawa Trough, Izena Hole. *Ore Geol. Rev.* 104194.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104194>

DirMin, 2016. Driftsplanveileder.
https://dirmin.no/sites/default/files/driftsplanveileder_rev_1_1_komplett_jan_20.pdf

DNV GL, 2016. Recommended practice. Managing environmental aspects and impacts of seabed mining. DNVGL-RP-O601.

DSMA, 2017. Joint French-German Deep-Sea Mining Activities - Expertise and Visions [WWW Document]. URL http://www.jarowinsky-marketing.de/fileadmin/Downloads/Joint_French-German_Deep_Sea_Mining_Activities_2017.pdf (accessed 5.23.21).

Ellefmo, S. L., Søreide, F., 2019. Quantifying the Unknown. Marine Mineral Resource Potential on the Norwegian Extended Continental Shelf. Cappelen Damm.

European Commission, 2020. Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) Final Report. European Union.

Firstova, A., Stepanova, T., Sukhanova, A., Cherkashov, G., Poroshina, I., 2019. Au and Te Minerals in Seafloor Massive Sulphides from Semyenov-2 Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge. *Minerals* 9, 294. <https://doi.org/10.3390/min9050294>

Framstad, A.P., Sundberg, J.D., 2017. Norsk verft skal bygge diamant-skip. E24!. 20.11.2017. https://e24.no/naeringsliv/i/J1d4QR/norsk-verft-skal-bygge-diamant-skip?utm_source=kopierlink&utm_content=deleknapp&utm_campaign=bunn.

German, C.R., Yoerger, D.R., Jakuba, M., Shank, T.M., Langmuir, C.H., Nakamura, K., 2008. Hydrothermal exploration with the Autonomous Benthic Explorer. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 55, 203–219. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2007.11.004>

Glasby, G.P., Li, J., Sun, Z., 2015. Deep-Sea Nodules and Co-rich Mn Crusts. *Mar. Georesources Geotechnol.* 33, 72–78. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.784838>

Graber, S., Petersen, S., Yeo, I., Szitkar, F., Klischies, M., Jamieson, J., Hannington, M., Rothenbeck, M., Wenzlaff, E., Augustin, N., Stobbs, I., 2020. Structural Control, Evolution, and Accumulation Rates of Massive Sulfides in the TAG Hydrothermal Field. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 21. <https://doi.org/10.1029/2020GC009185>

GSR, 2018. Environmental Impact Statement. Small-scale testing of nodule collector components on the seafloor of the Clarion-Clipperton Fracture Zone and its environmental impact.

Gwyther, D., Wright, M., 2008. Environmental impact statement - Nautilus Minerals Niugini Limited. Solwara 1 project (No. CR 7008_09_v4). Coffey Natural Systems Pty Ltd, BRISBANE, QLD.

Hannington, M., Jamieson, J., Monecke, T., Petersen, S., Beaulieu, S., 2011. The abundance of seafloor massive sulfide deposits. *Geology* 39, 1155–1158. <https://doi.org/10.1130/G32468.1>

Hannington, M.D., De Ronde, C.E.J., Petersen, S., 2005. Sea-Floor Tectonics and Submarine Hydrothermal Systems, in: One Hundredth Anniversary Volume. Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/AV100.06>

Hannington, M.D., Galley, A.G., Herzig, P.M., Petersen, S., 1998. COMPARISON OF THE TAG MOUND AND STOCKWORK COMPLEX WITH CYPRUS-TYPE MASSIVE SULFIDE DEPOSITS, in: Herzig, P.M., Humphris, S.E., Miller, D.J., Zierenberg, R.A. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, 158 Scientific Results, Proceedings of the Ocean Drilling Program. Ocean Drilling Program.* <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.158.1998>

Haugan, P.M., L.A. Levin, D. Amon, M. Hemer, H. Lily and F.G. Nielsen. 2020. What Role for Ocean-Based Renewable Energy and Deep Seabed Minerals in a Sustainable Future? Washington, DC: World Resources Institute.

Hein, J.R., 2002. Cobalt-rich Ferromanganese Crusts: Global distribution, composition, origin and research activities, i: ISA Technical study: No. 2. Polymetallic Massive Sulphides and Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts: Status and Prospects. International Seabed Authority.

- Hein, J.R., Koschinsky, A., 2014. Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules, in: Treatise on Geochemistry. Elsevier, pp. 273–291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01111-6>
- Hein, J.R., Mizell, K., Koschinsky, A., Conrad, T.A., 2013. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geol. Rev.* 51, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.12.001>
- Hellevang, J og Pedersen, R.B., 2005. Magmatic segmentation of the northern Knipovich Ridge. Evidence of an ultraslow spreading ridge. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. Vol 6 no 9.
- Hölz, S., Haroon, A., Martins, S., 2019. RV POSEIDON Fahrtbericht / Cruise Report POS535 - Loki2GrimseyEM: Geophysical and geological investigations of massive sulfides at and in the vicinity of Loki's Castle (Norway) and similar experiments around the Grimsey Hydrothermal Field (Iceland) for the assessment of the geothermal potential and the exploration for potential mineralizations within the seafloor (Cruise Report No. Nr. 53 2019), RV POSEIDON Fahrtbericht. GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Kiel.
- Horizon. 2014. HORIZON 2020 –WORK PROGRAMME 2014-2015. Appendix G Technology readiness levels (TRL). https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf
- Howard P, Parker G, Jenner N. Holland T. 2020. Fauna & Flora International (FFI). 2020. An Assessment of the Risks and Impacts of Seabed Mining on Marine Ecosystems. FFI: Cambridge U.K.
- ISA, 2019. Draft regulations on exploitation of mineral resources in the Area. Document ISBA/25/C/18. Dated 27 March 2019. <https://ran-s3.s3.amazonaws.com/isa.org/im/s3fs-public/files/documents/25c-18-en.pdf> .
- ISO 16290:2013. Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment.
- Jamieson, J.W. and Gartmann, A. 2020. Defining active, inactive, and extinct seafloor massive sulfide deposits. *Marine Policy*, Volume 117, July 2020, 103926.
- Järngren, J., S. Brooke, H. Jensen 2017. Effects of drill cuttings on larvae of the cold-water coral *Lophelia*. *Deep-Sea Research II* (137): 454-462.
- Johansen, S.E., Panzner, M., Mittet, R., Amundsen, H.E.F., Lim, A., Vik, E., Landrø, M., Arntsen, B., 2019. Deep electrical imaging of the ultraslow-spreading Mohns Ridge. *Nature* 567, 379–383.
- Keisuke, W., Yoshiyasu, W., Fumio, Y., Tatsuki, N., 2015. A Vertical Mining System Concept Using DTH for Seafloor Mining. <https://doi.org/10.4043/25825-MS>
- Knodt, S., Kleinen, T., Dornieden, C., Lorscheidt, J., Bjørneklett, B., Mitzlaff, A., 2016. Development and Engineering of Offshore Mining Systems - State of the Art and Future Perspectives, in: Day 2 Tue, May 03, 2016. Presented at the Offshore Technology Conference, OTC, Houston, Texas, USA. <https://doi.org/10.4043/27185-MS>
- Knodt, S., Kleinen, T., 2012. Deepsea Riser Lift via Air Lift Technology. Presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, p. 5.
- Kowalczyk, P., Lum, B., 2017. Sea Floor Mining Exploration Technology and Meth, in: Proceedings of Exploration. Presented at the Proceedings of Exploration 17: Sixth Decennial International Conference on Mineral Exploration, p. 14.

Lesage, Maxime. "A Framework for Evaluating Deep Sea Mining Systems for Seafloor Massive Sulphides Deposits." Doctoral theses at NTNU; 2020:280, Norwegian University of Science and Technology, 2020. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2677911>.

Liao, S., 2020. A buoyancy vertical transport system of deep-sea mining. *Journal of Ocean Engineering and Science* 5, 294–295. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.05.003>

Liefmann, S., J. Jarnegren, G. Johnsen, F. Murray 2018. Eco-physiological responses of cold-water soft corals to anthropogenic sedimentation and particle shape. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 504 (2018): 61-71.

Lim, Anna; Brønner, Marco; Johansen, Ståle Emil; Dumais, Marie-Andrée. 2019. Hydrothermal activity at the ultraslow-spreading Mohs Ridge: new insights from near-seafloor magnetics. *Geochemistry Geophysics Geosystems*; Volume 20.(12) s. 5691-5709

Lipton, I., 2012. Technical Report compiled under NI43-10.

Liu, S., Hu, J., Zhang, R., Dai, Y., Yang, H., 2016. Development of mining technology and equipment for seafloor massive sulfide deposits. *Chin. J. Mech. Eng.* 29, 863–870. <https://doi.org/10.3901/CJME.2016.0815.093>

Lov om mineralvirksomhet på kontinentalsokkelen (havbunnsmineralloven), 2019. Olje- og energidepartementet, ikrafttredelse 01.07.2019. <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2019-03-22-7?q=havbunnsmineraler>

Ludvigsen, M., Aasly, K., Ellefmo, S., Hilario, A., Ramirez-Llodra, E., Søreide, F., Falcon-Suarez, I., Juliani, C., Kieswetter, A., Lim, A., Malmquist, C., Nornes, S.M., Paulsen, E., Reimers, H., Sture, Ø., 2016. MarMine Cruise Report - Arctic Mid-Ocean Ridge (AMOR) 15.08.2016 – 05.09.2016, NTNU Cruise Reports no 1. NTNU, Trondheim.

Macdonald, K.C., Becker, K., Spiess, F.N., Ballard, R.D., 1980. Hydrothermal heat flux of the "black smoker" vents on the East Pacific Rise. *Earth Planet. Sci. Lett.* 48, 1–7. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90163-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90163-6)

Maddock, J. E. L., Carvalho, M. F., Santelli, R. E., & Machado, W. 2007. Contaminant metal behaviour during re-suspension of sulphidic estuarine sediments. *Water, Air, and Soil Pollution*, 181, 193–200

Martens, E., Prommer, H., Sprocati, R., Sun, J., Dai, X., Crane, R., Jamieson, J., Tong, P.O., Rolle, M., Fourie, A., 2021. Toward a more sustainable mining future with electrokinetic in situ leaching. *Sci Adv* 7, eabf9971. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf9971>

MIDAS, 2016. MIDAS project - Managing Impacts of Deep-sea resource exploitation. <https://www.eu-midas.net/>

Mining-technology.com, 2018. Giant mining vessels: how high-quality gems are exploited from the sea. <https://www.mining-technology.com/features/giant-mining-vessels-how-high-quality-gems-are-exploited-from-the-sea/>. 27. November, 2018, Accessed 23. May, 2021.

Mizell, WM and Hein, JR 2018. Ferromanganese Crusts and Nodules: Rocks that Grow. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*.

Molemaker, R.-J., Gille, J., Kantor, E., van Schijndel, M., Pauer, A., von Schickfus, M.-T., van Elswijk, J., Beerman, R., Hodgson, S., Beaudoin, Y., Baker, E., Bredbenner, A., Harris, P., MacMillan-Lawler, M., Petersen, S., Weaver, P., Billet, D., Ruhl, H., Buxton, M., Benndorf, J., Voncken, J., 2014. Study to investigate the state of knowledge of deep-sea mining. Ecorys, Brussel.

Murton, B.J., Lehrmann, B., Dutrieux, A.M., Martins, S., de la Iglesia, A.G., Stobbs, I.J., Barriga, F.J.A.S., Bialas, J., Dannowski, A., Vardy, M.E., North, L.J., Yeo, I.A.L.M., Lusty, P.A.J., Petersen, S., 2019. Geological fate of seafloor massive sulphides at the TAG hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge). *Ore Geol. Rev.* 107, 903–925. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.03.005>

Nakajima, R., Yamamoto, H., Kawagucci, S., Takaya, Y., Nozaki, T., and Chen, C. (2015). Post-drilling changes in seabed landscape and megabenthos in a deepsea hydrothermal system, the iheya north field, Okinawa Trough. *PLoS One* 10:e0123095. doi: 10.1371/journal.pone.0123095.g007

Nakajima, Y., Yamamoto, J., Takahashi, T., Thornton, B., Yamabe, Y., Dodbiba, G., Fujita, T., 2019. Development of Elemental Technologies for Seafloor Mineral Processing of Seafloor Massive Sulfides, in: Volume 6: Ocean Space Utilization. Presented at the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Glasgow, Scotland, UK, p. V006T05A014. <https://doi.org/10.1115/OMAE2019-96040>

Niner, Holly J., Jeff A. Ardron, Elva G. Escobar, Matthew Gianni, Aline Jaeckel, Daniel O. B. Jones, Lisa A. Levin et al. 2018. "Deep-Sea Mining With No Net Loss of Biodiversity—An Impossible Aim." *Frontiers in Marine Science* 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00053>

National Snow and Ice Data Center, 2021. <https://nsidc.org/>

Nishi, Y., 2013. Determining the grounding length of an axially moving cable in a two-ship continuous line bucket system. *Applied Ocean Research*, Volume 40, March 2013, Pages 42-49.

Nozaki, T., Tokumaru, A., Takaya, Y., Kato, Y., Suzuki, K., Urabe, T., 2016. Major and trace element compositions and resource potential of ferromanganese crust at Takuyo Daigo Seamount, northwestern Pacific Ocean. *Geochem. J.* 50, 527–537. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0430>

NVE, 2012. Havvind. Strategisk konsekvensvurdering. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2012/rapport2012_47.pdf

Okamoto, N., Shiokawa, S., Kawano, S., Sakurai, H., Yamaji, N., Kurihara, M., 2018. Current Status of Japan's Activities for Deep-Sea Commercial Mining Campaign, in: 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). Presented at the 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean (OTO), IEEE, Kobe, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2018.8559373>

Okamoto, N., Shiokawa, S., Kawano, S., Yamaji, N., Sakurai, H., Kurihara, M., 2019a. World's First Lifting Test for Seafloor Massive Sulphides in the Okinawa Trough in the EEZ of Japan, in: ISOPE-I-19-655. Presented at the The 29th International Ocean and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers, ISOPE, p. 7.

Okamoto, N., Igarashi, Y., Matsui, T., Fukushima, T., 2019b. Preliminary Results of Environmental Monitoring of Seafloor Massive Sulphide Excavation and Lifting Tests in the Okinawa Trough, in: Proceedings of the Twenty-Ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, June 16-21, 2019. Presented at the International Ocean and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA.

Olje- og energidepartementet, 2021. Forslag til program for konsekvensutredning etter havbunnsmineralloven. Høringsdokument.

Oljedirektoratet, 2020-a. Resource Report Exploration 2020.

Oljedirektoratet, 2020-b. Det første funnet i Norskehavet. Nor. Sokkel 2020, 6.

OSPAR, 1998. Decision 98/3 on the Disposal of Disused Offshore Installations.

Parenteau, T., Espinasse, P., Benbia, A. og Ngim, B. (2013) Subsea mining field development concept using a subsea crusing and feeding unit. OTC 2013.

Parianos, J., Manocchio, A., 2018. New tools for SMS. *SeaTechnology* 59, 15–20.

Pedersen, R. B., & Bjerkgård, T. (2016). Seafloor Massive Sulphides In Arctic Waters. In B. Rognvald, T. Bjerkgård, B. Nordahl, & H. Schiellerup (Eds.), *Mineral Resources In The Arctic* (1st ed., pp. 209–216). Geological Survey Of Norway.

Pedersen, R.B., Rapp, H.T., Thorseth, I.H., Lilley, M.D., Barriga, F.J.A.S., Baumberger, T., Flesland, K., Fonseca, R., Früh-Green, G.L., Jorgensen, S.L., 2010. Discovery of a black smoker vent field and vent fauna at the Arctic Mid-Ocean Ridge. *Nat Commun* 1, 126. <https://doi.org/10.1038/ncomms1124>

Pedersen, R.B., Thorseth, I.H., Nygård, T.E., Lilley, M.D., Kelley, D.S., 2010. Hydrothermal activity at the Arctic mid-ocean ridges, in: Rona, P.A., Devey, C.W., Dymont, J., Murton, B.J. (Eds.), *Geophysical Monograph Series*. American Geophysical Union, Washington, D. C., pp. 67–89. <https://doi.org/10.1029/2008GM000783>

Petersen, S., Haeckel, M., Steffen, J., Kersten, C., 2020 eds and the Strategy Group “Mineral Resources” of the German Marine Research Consortium (KDM). *Mineral Resources of the Deep Sea: Formation, Potential and Risks*. <https://oceanrep.geomar.de/51044/>

Petersen, S., Krätschell, A., Augustin, N., Jamieson, J., Hein, J.R., Hannington, M.D., 2016. News from the seabed – Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources. *Mar. Policy* 70, 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.03.012>

Petersen, W., Willer, E., & Willamowski, C. 1997. Remobilization of trace elements from polluted anoxic sediments after resuspension in oxic water. *Water, Air, and Soil Pollution*, 99, 515–522.

Pineda MC, Strehlow B, Sternal M, Duckworth A, Jones R, Webster NS. 2017. Effects of suspended sediments on the sponge holobiont with implications for dredging management. *Scientific reports* 7:4925.

Reinardy, H., Pedersen, K. B., Nahrgang, J., Frantzen, M. 2019. Effects of Mine Tailings Exposure on Early Life Stages of Atlantic Cod. *Environmental Toxicology and Chemistry—Volume 38, Number 7—pp. 1446–1454*.

Reistad, Magnar, Øyvind Breivik, Hilde Haakenstad, Ole Johan Aarnes, Birgitte R. Furevik, and Jean-Raymond Bidlot. “A High-Resolution Hindcast of Wind and Waves for the North Sea, the Norwegian Sea, and the Barents Sea.” *Journal of Geophysical Research* 116, no. C5 (May 26, 2011): C05019. <https://doi.org/10.1029/2010JC006402>.

Schulte, S.A., 2013. Vertical transport methods for Deep Sea Mining (Master thesis). TU Delft

Secretariat of the Pacific Community, 2013. *Deep Sea Minerals: SeaFloor Massive Sulphides, a physical, biological, environmental, and technical review*. Vol. 1A, SPC.

Smit, M. G. D, Holthaus, K. I. E, Trannum, H. C., Neff, J. M., Kjeilen-Eilertsen, G, Jak, R. G., Singasaas, I., Huijbregts, M. A. J., Hendriks, J. A., 2008. Species sensitivity distributions for suspended clays, sediment burial, and grain size change in the marine environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 27, No. 4, pp. 1006–1012, 2008.

Snook, B., Drivenes, K., Rollinson, G., Aasly, K., 2018. Characterisation of Mineralised Material from the Loki's Castle Hydrothermal Vent on the Mohn's Ridge. *Minerals* 8, 576. <https://doi.org/10.3390/min8120576>

Spagnoli, G., Rongau, J., Denegre, J., Miedema, S.A., Weixler, L., 2016. A Novel Mining Approach for Seafloor Massive Sulfide Deposits, in: Day 2 Tue, May 03, 2016. Presented at the Offshore Technology Conference, OTC, Houston, Texas, USA, p. D021S028R002. <https://doi.org/10.4043/26870-MS>

Spearman J, Taylor J, Crossouard N, Cooper A, Turnbull A, Manning A, Lee M, Murton B. 2020. Measurement and modelling of deep sea sediment plumes and implications for deep sea mining. *Nature Scientific Reports* volume 10, Article number: 5075.

Standard Norge, 2017. NORSOK N-003 Actions and action effects (Edition 3, 2017)

Svavarsson J, Brattegard T. Strömberg JO. 1990. Distribution and diversity patterns of asellote isopods (Crustacea) in the deep Norwegian and Greenland Seas. *Progress in Oceanography*, 24(1), 297-310. doi:10.1016/0079-6611(90)90039-5

Tanaka, E., Nakamura, K., Yasukawa, K., Mimura, K., Fujinaga, K., Ohta, J., Iijima, K., Nozaki, T., Machida, S., Kato, Y., 2020. Chemostratigraphic Correlations of Deep-Sea Sediments in the Western North Pacific Ocean: A New Constraint on the Distribution of Mud Highly Enriched in Rare-Earth Elements. *Minerals* 10, 575. <https://doi.org/10.3390/min10060575>

Tjensvoll, I., T. Kutti, J. H. Fosså, R. J. Bannister 2013. Rapid respiratory responses of the deep-water sponge *Geodia barretti* exposed to suspended sediments. *Aquatic Biology* 19 (2013): 65-73.

Universitetet i Bergen (UiB), 2021 in prep. Pelagiske økosystem i Norskehavet – grunnlagsstudie. Kutti m.fl.

Van Bloois, J.W., Frumau, J., 2009. SS. Ocean Mining: Deep Sea Mining: A New Horizon for Dredging Technology. <https://doi.org/10.4043/20047-MS>

Van Dover, C.L., J.A. Ardron, E. Escobar, M. Gianni, K.M. Gjerde, A. Jaeckel, D.O.B. Jones et al. 2017. "Biodiversity Loss from Deep-Sea Mining." *Nature Geoscience* 10 (7): 464–65. <https://doi.org/10.1038/ngeo2983>.

Vereshchagin, O.S., Perova, E.N., Brusnitsyn, A.I., Ershova, V.B., Khudoley, A.K., Shilovskikh, V.V., Molchanova, E.V., 2019. Ferro-manganese nodules from the Kara Sea: Mineralogy, geochemistry and genesis. *Ore Geology Reviews* 106, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.023>

Watanabe, Y., Watanabe, K., Yuasa, F., Nazuka, T., 2016. A Self-Walking Vertical Mining System Concept Using DTH for Seafloor Mining and Its Preliminary Design. <https://doi.org/10.4043/27003-MS>

Yamazaki, T., Takeda, Y., Arai, R., Nakatani, N., 2016. Economic Seafloor Massive Sulfide Mining by Japan's Model, in: Volume 6: Ocean Space Utilization; Ocean Renewable Energy. Presented at the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Busan, South Korea, p. V006T05A002. <https://doi.org/10.1115/OMAE2016-54575>

Yu, A. og Espinasse, P. (2009) Extending Deepwater Technology to Seafloor Mining. OTC 2009.



APPENDIKS 1

Notat fra Oljedirektoratet vedrørende fasthet av havbunnen for områder på Mohns-ryggen undersøkt av Oljedirektoratet i perioden 2018-2020.

Fasthet av havbunnen for områder på Mohns-ryggen undersøkt av Oljedirektoratet 2018-2020

DNV utfører et teknologistudie for Oljedirektoratet til konsekvensutredning for mineralvirksomhet på norsk kontinentalsokkel. På bestilling fra DNV har OD i dette notatet oppsummert sin erfaring om fasthet av bunnforhold i områdene på og rundt de identifiserte forekomstene Fåvne, Gnitahoi og Mohns-skatten. Det er lagt vekt på å beskrive ODs observasjoner av havbunnens egenskaper om hardhet og fasthet, samt erfaring med plassering av utstyr på havbunnen.

Oljedirektoratet har gjennomført tre egne tokt (2018, 2019 og 2020). Toktene i 2018 og 2019 var hovedsakelig havbunnkartlegging og undersøkelse med ROV / AUV. På toktet i 2020 gjennomførte OD boring med kveilerør, samt prøvetaking med ROV. OD påpeker at det ikke har vært utført direkte grunntekniske undersøkelser mht fasthet eller penetrasjon av bunnen. Alle toktene har vært i nordlige del av Mohnsryggen-området.

OD har i hovedsak observert tre typer bunnforhold:

- Hard havbunn
- Bløt havbunn
- Hard, men ustabil havbunn på de aktive sulfidforekomstene

Hard havbunn

Havbunnen i studieområdet består hovedsakelig av harde vulkanske bergarter som danner en røff topografi. Dette kan være putelava, sprengt putelava og ulike former for vulkanske breksjer og gabbro.

Bløt havbunn

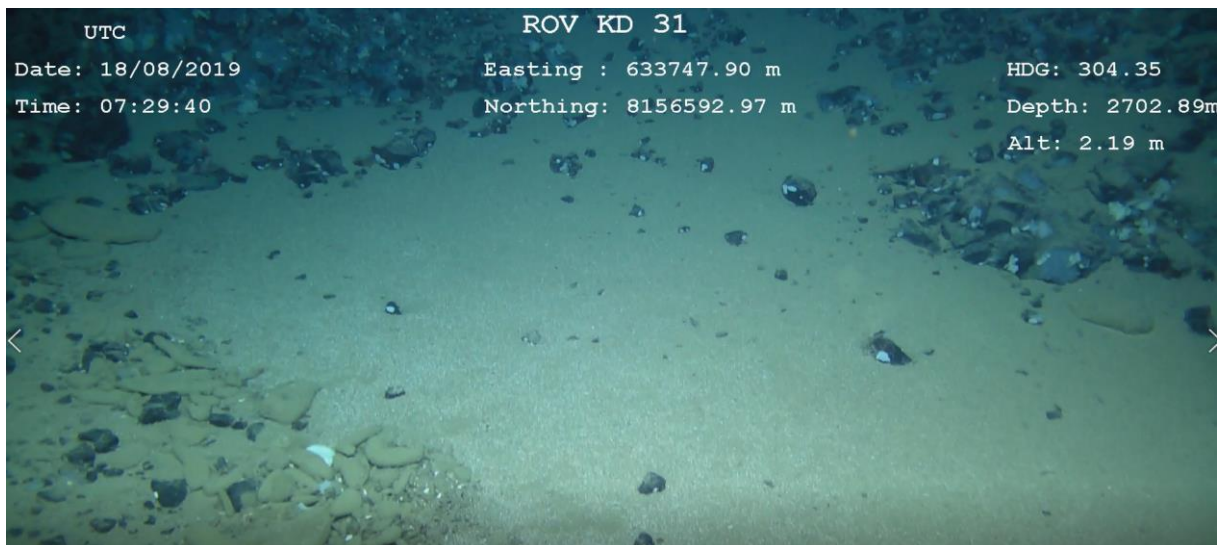
Store områder er dekket av lys, svært finkornet sediment som gir bløt havbunn. I 2018 tok OD noen korte (30 cm) push-kjerner med ROV. Enkelte prøver ble vasket for å se på innhold, og nesten alt gikk gjennom den fineste sikten som leirfraksjon. Residuet besto av planktoniske foraminiferer og enkelte svampespikler, men ikke noe klastisk materiale. Det var ventet å finne mer svampespikler, da det stedvis er mye svamp og enkelte bunnforhold så ut til å ha noe mer fast bunn med slike spikler. Sedimentene antas å være leire, omdannet fra vulkanske bergarter.

Det ble gjort et forsøk med å sette ROV ned på bunnen i et slikt leirområde (se foto). Meiene på utstyret sank ned mindre enn 10 cm, og det ble etterlatt spor med bratte sider. OD har også observert enkelte eldre spor fra ROV og fra sleping av utstyr.

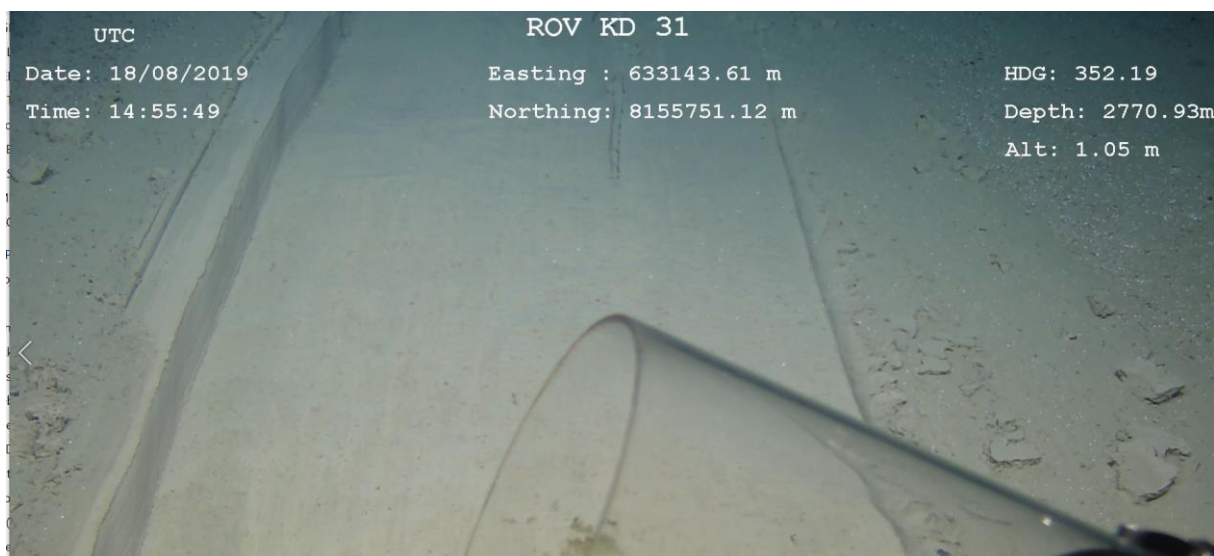


Bløt havbunn med lys leire. De mørkere områdene virket noe mer faste.

Korte «push-corer» påmontert ROV for prøvetaking av sedimenter.



Typisk bløtbunn utenom sulfidforekomster.



Avtrykk etter at ROV ble satt ned i sedimentet.



Prøvetaking med skuffe av bløte havbunnsedimenter

Bunnforhold på sulfidforekomstene:

Topografien på de tre undersøkte områdene er sterkt varierende. Disse omfatter både aktive og inaktive sulfidforekomster. ODs observasjoner er at havbunnen over de inaktive forekomstene er hard og skiller seg som sådan ikke fra den harde havbunnen ellers. Havbunnen der det er aktive forekomster er også hard, men kan være ustabil på grunn av den pågående, vulkanske aktiviteten.

Fåvne-forekomsten ligger på en flate, men med sulfidtopografi i form av skorsteiner opp til 20 meter, skarpe egger og sammenfalte grushauger. Sulfidene forekommer som brune, svært finkornede og løse avsetninger. En del strukturer, oftest med jevn brunfarge, er svært løse, og ved prøvetaking med ROV faller de fullstendig sammen. Forsøk med tidligere omtale push-kjerner hadde varierende suksess, og harde lag ble påtruffet raskt.

Fåvne-forekomsten består også av sulfidavsetninger i form av skorsteiner eller sammenkittet materiale. Ofte er de mer mørke eller sorte, og svært harde. Flere ganger var det problematisk å knipe av biter med ROV-armen.



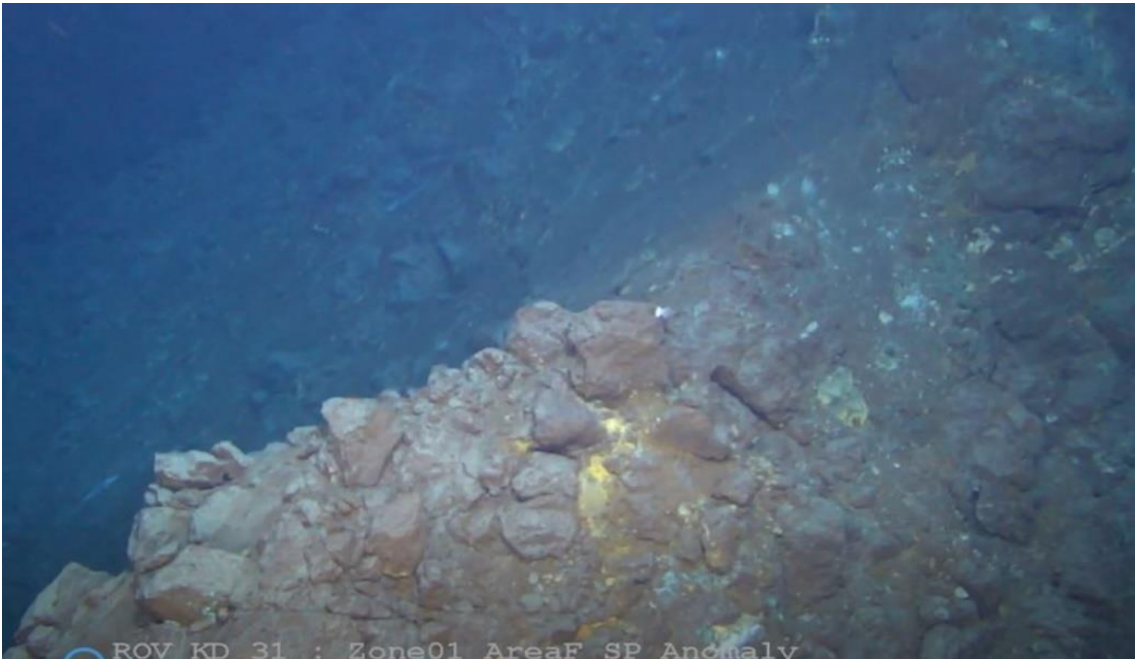
Fåvne med nedraste skorsteiner og grushauger med delvis eroderte sulfider.

Mohns-skatten består i stor grad av hardere sulfidavsetninger og gjerne oppstikkende, eroderte skorsteiner og grushauger. Området er også karakterisert av en større rasgrop, der blokkmateriale og skorsteiner ligger nedover mot selve rastungen som er på over 4000 meters dyp. En del blokker er vitret som omtalt over, og det var vanskelig å ta prøver av disse fordi de falt sammen ved berøring. Generelt virket imidlertid Mohns-skatten å bestå av fastere sulfidmateriale.



Mohnsskatten med sluknede og eroderte skorsteiner på faste grushauger. Bildet er fra kanten av rasskråningen som er omtalt over.

Gnitahei er en utdødd forekomst som morfologisk består av to rygger med rasområde på 2-300 meters lengde. Observasjoner i 2019 og 2020 viser at forekomsten består for det meste av blokker med massive sulfider, trolig mye pyritt. Boring i 2020 ble gjort uten bunnramme og viste at havbunnen er svært hard. Det var ingen områder som var tilstrekkelig store og flate for å sette ned bunnrammen.



Gnitahei-ryggen (2787 m) med sulfid-blokker.

Under boreoperasjonen i 2020 ble det på Fåvne og Mohns-skatten brukt en bunnramme på 30 tonn. Bunnrammen hadde fire støtteføtter, hver med en plate på ca en halv m². Det ble ikke påvist problem med innsynkning eller fastsuging av utstyret hverken på Fåvne eller Mohns-skatten.

APPENDIKS 2

I tabellen under gis det en nærmere forklaring / definisjon til et utvalg av de begreper som er brukt i rapporten. Videre er den engelske benevnningen gitt for de forskjellige begrepene.

Kategori	Forkortelse Engelsk	Engelsk	Norsk	Forklaring / definisjon
Brytningsmetoder		Horizontal mining methods	Horisontale brytningsmetoder	Man driver primært horisontalt, typiske i skiver.
Brytningsmetoder		Vertical mining methods	Vertikale brytningsmetoder	Metoder der man bryter primært vertikalt og flytter så hele produksjonsutstyret horisontalt etter vært som produksjonen skrider frem
Fragmentering		Horizontal cutting concepts	Horisontal kutting	
Fragmentering		Vertical cutting concepts	Vertikal kutting	Man driver nedover over et begrenset areal og bergarten fragmenteres ved at det induseres spenninger i berget med diskere eller ulike varianter av pigger (ulike geometrier er mulige) som presses ned mot berget med stor kraft. +/- flerdimensjonal rotasjon
Geologi		Cobalt-rich ferromanganese crusts	Manganskorpe	Jern og manganholdig skorpe med et anomalt innhold av kobolt og potensielt andre metaller. Dannet gjennom utfelling fra havvann og typisk avsatt og funnet på harde bergarter (undersjøisk fjell) på dyphavet (dvs. f.eks. ikke på sandig eller leirholdig havbunn).
Geologi	eSMS	Extinct (inactive or dormant) Seafloor massive Sulphides	Inaktive massive havbunnsmalmer	Massive havbunnsmalmer / polymetalliske sulfidforekomster der det er lite eller ingen hydrotermal aktivitet.
Geologi		Mound	Kolle	Kolle som dannes som følge syklusen med vekst – kollaps – og ny vekst av hydrotermale skorsteiner. Karakteristisk

Kategori	Forkortelse Engelsk	Engelsk	Norsk	Forklaring / definisjon
				kjegleformet og bestående hovedsakelig av fragmenter av kollapsede skorsteiner og utfelte sedimenter fra skorsteinsskyen.
Geologi	PMN	Polymetallic nodules	Polymetalliske noder	En forekomst av noder på havbunnen som inneholder mangan, jern, nikkel, kobolt, kobber og sink. Nodulene kan være delvis dekket av sedimenter
Geologi	PMS	Polymetallic sulphides	Polymetalliske sulfidforekomster	Hydrotermalt dannede sulfidforekomster som inneholder metaller, inkludert kobber, bly, sink, gull, sølv og kobolt. Kalles også SMS = Seafloor Massive Sulphides. Kan være aktive eller inaktive, men PMS og SMS forbindes som oftest med hydrotermalt aktive felt.
Geologi	SMS	Seafloor Massive sulphides	Massive havbunnsmalmer	Se polymetalliske sulfidforekomster
Geologi		Seamounts	Undersjøiske fjell	Signifikante topografiske høyder / fjelltopper på havbunnen. Vanligvis vulkansk opphav.
Havbunnsaktiviteter	AC	Auxiliary Cutter	Hjelpeproduksjonsenhet	Utstyr som ble planlagt brukt av Nautilus Minerals til å forberede havbunnen (jevne ut ujevnheter) for bulkutvinning. Malm ble sendt til mellomlager et det mest aktuelle brytningsalternativet.
Havbunnsaktiviteter		Buffer bin	Mellomlagerkonteiner	Konteiner som brukes til mellomlagring av produsert malm før vertikaltransport
Havbunnsaktiviteter	BC	Bulk cutter	Hovedproduksjonsenhet	Hovedenheten som stod for majoriteten av fragmenteringen i brytningsopplegget til Nautilus Minerals. Malm ble sendt til mellomlager i det mest aktuelle brytningsalternativet.

Kategori	Forkortelse Engelsk	Engelsk	Norsk	Forklaring / definisjon
Havbunnsaktiviteter	CM	Collection machine	Oppsamlingsenheten	Enheten som samlet sammen malmen som var fragmentert av de AC'en og BC'en og sendt til et mellomlager på havbunnen. Denne enheten var da linken mellom mellomlageret og vertikaltransporten (RALS). Ulike alternative løsninger er aktuelle.
Havbunnsaktiviteter	HPU	Hydraulic Power Unit	Hydraulisk energiproduksjonsenhet	
Havbunnsaktiviteter	SPT	Seafloor Production tools	Havbunnsproduksjonsutstyr	
Havbunnsaktiviteter	SCUF	Subsea Crushing and Feeding Unit	Knuse- og mateenhet på havbunnen	En mulig del av et brytningssystem som knuser produsert malm på havbunnen og mater den knuste malmen til systemet for vertikaltransport.
Havbunnsaktiviteter		Working face / face	Stuff	Overflaten hvor utvinningsaktiviteten foregår
Overordnet		Continental shelf	Kontinentalsokkel	Minst til 200 nautiske mil fra kysten, men kan gå utenfor.
Overordnet		Cut-off	Cut-off	En grenseverdi som brukes i definering av ressurser og reserver. I forbindelse med defineringen av metallholdige malmer definerer cut-off'en som oftest en minste gehalt en malm må ha for kunne utvinnes med profitt. Cut-off kan også benyttes for å definere en maksverdi; dvs. malmen kan ikke inneholde mer enn et element eller mineral for å kunne defineres som malm.
Overordnet	DSM	Deep Sea mining	Dypmarin mineralutvinning	Marin mineralutvinning innenfor utredningsområdet

Kategori	Forkortelse Engelsk	Engelsk	Norsk	Forklaring / definisjon
Overordnet	EEZ	Exclusive Economic Zone	Eksklusiv økonomisk sone	Havområder innenfor 200 nautiske mil fra kysten. Et land har rettigheter til å forvalte alle ressurser i vannkolonnen og på og i havbunnen. Er ikke en del av et lands territorium.
Overordnet		Exploitation	Utvinning	Fasen etter at en forekomst er funnet og beskrevet. Inkluderer nødvendige investeringer gjort for å etablere brytningssystemet.
Overordnet		Exploration	Leting	Leting etter (lokalt), beskrivelse og karakterisering av forekomster og deres potensial for utvinning, inkludert miljøfaktorer (tenk modifierende faktorer i overgangen mellom ressurs og reserve)
Overordnet		Extended continental shelf	Utvidet kontinentalsokkel	Et land har rettigheter til alle ressurser på og under havbunnen, men ikke i vannkolonnen.
Overordnet		Extended Economic Zone	Utvidet økonomisk sone	
Overordnet		Grade	Gehalt	Relativ mengde metall i en malm. Gjerne gitt i vekt-% eller ppm, parts per million.
Overordnet		Marine mining	Marin mineralutvinning	Marin mineralutvinning på kontinentalsokkelen
Overordnet		Ore	Malm	Begrepet "malm" er et økonomisk begrep som oftest brukt om metalliske forekomster som er godt nok kjent til å kalles reserver og som derfor kan utvinnes med profitt (og i henhold til lover og regler).

Kategori	Forkortelse Engelsk	Engelsk	Norsk	Forklaring / definisjon
Overordnet		Plume	Partikkelsky	En partikkelsky som kan genereres i forbindelse med utvinning av dypmarine mineraler. Om og i hvilken grad dette dannes vil være avhengig av brytningsmetode og hvilke tiltak man treffer for å minimere slik dannelse. En partikkelsky kan f.eks. utvikles i forbindelse med selve fragmenteringen på havbunnen og i forbindelse med returnering av slurryvann etter avvanning av malmslurryen på produksjonsstøttefartøyet.
Overordnet		Prospecting	Prospektering	Regional letevirksomhet der man forsøker å identifisere forekomster og gjøre førsteordens kvalitativ og kvantitativ beskrivelse av forekomstene man finner. Prospektering vil typisk komme før leting.
Overordnet		Reserve	Reserve	En mineralreserve (reserve) er definert som den del av en indikert eller målt ressurs som vil kunne utvinnes, inkludert gråbergsinnblanding, og hvor mineraler kan hentes ut på en økonomisk måte, gitt forutsetninger som er realistiske på det tidspunktet bedømmelsen foretas. En mineralreserve trenger IKKE være besluttet utbygget. Definerings av en reserve er avhengig av de modifierende faktorene: brytningsmetode (og dennes egenskaper), oppredningsteknologi (og dennes egenskaper), økonomi (f.eks. råvarepriser), markedsfaktorer, juridiske faktorer, miljøaspekt, sosiale aspekt og forvaltningsaspekt (offentlig forvaltning). Et reserveestimat gis som en tonnasje med en viss gehalt

Kategori	Forkortelse Engelsk	Engelsk	Norsk	Forklaring / definisjon
				over en viss cut-off. En reserve vil i praksis alltid være mindre enn en ressurs (tonnasje).
Overordnet		Resource	Ressurs	En mineralressurs (ressurs) er en identifisert mineralforekomst in situ, der det er mulig å hente ut verdifulle eller nyttige mineraler. Identifisering av en ressurs vil bygge på geologiske data. Det må imidlertid være en forutsetning at det er en rimelig mulighet for eventuell økonomisk utnyttelse. En ressurs kan kategoriseres i forhold til mengden geologiske data og kvaliteten av disse i kategoriene "antatt", "indikert" og "målt". Et ressursestimat gis som en tonnasje med en viss gehalt over en viss cut-off.
Overordnet		Tonnage	Tonnasje	Mengde gitt i tonn av malm eller gråberg.
Pumpesystem		Centrifugal pump	Sentrifugalpumpe	En sentrifugalpumpe er en rotodynamisk Pumpe som bruker en roterende impeller (løpehjul) for å øke trykket i en væske.
Pumpesystem		Flexible riser	Fleksibelt stigerør	Fleksibelt stigerør er et rør som brukes som forbindelse mellom en petroleumsbrønn på havbunnen og en borerigg eller en flytende produksjonsplattform
Pumpesystem		Hydraulic pump system	Hydraulisk pumpesystem	Hydraulikkpumpe er koblet til en drivmotor som genererer en mekanisk rotasjon. Rotasjonen gjør at hydraulikkpumpen kan hente fluid fra "reservoaret" (f.eks. en tank med malmslurry (se slurry)) gjennom en sugoport. Deretter blir fluiden drevet ut på pumpens trykkside og videre ut i systemet. Den mekaniske

Kategori	Forkortelse Engelsk	Engelsk	Norsk	Forklaring / definisjon
				energien blir omdannet til hydraulisk energi.
Pumpesystem		Positive displacement pump	Fortrengningspumpe	En fortrengningspumpe er en pumpe som lukker en mengde fluid inn i et fast volum, for så å presse dette volumet ut gjennom utløpet av pumpa.
Støtteprosesser		Trench cutting	Grøftedrivning	Det drives en grøft uten bruk av boring og sprenging, men heller en variant av horisontal eller vertikal kutting.
Top side	FPSO	Floating Production, Storage and Offloading	Flytende enhet for produksjon, lagring og lossing	Flytende semimobil plattform som normalt brukes i petroleumsvirksomhet til havs for å prosessere, lagre og utskipe petroleumprodukter
Top side	LARS	Launch and Recovery System	System for håndtering av produksjonsutstyret på havbunnen og i vannkolonnen	System montert på infrastruktur på havoverflaten (f.eks. en PSV eller en FPSO) som brukes til å sjøsette eller bringe produksjonsutstyr tilbake opp på infrastrukturen.
Top side	PSV	Production support vessel	Produksjonsstøttefartøy	Fartøy på overflaten som produserer energi, som avvanner malmen, styrer produksjonen, driver og planlegger vedlikehold etc.
Vertikaltransport		Air-lift system	Pneumatisk drevet system for vertikaltransport i rør; lufttrykkssystem (gassløft, mammutpumpe)	Luft injiseres inn i stigerøret. Denne luften vil stige og skape en oppoverrettet strøm som frakter med seg slurryen.
Vertikaltransport		Batch cable-lifting	Enkeltvis løft med kabel	Vertikaltransport der malmskipper / containere løftes en og en opp til overflaten fra havbunnen.
Vertikaltransport		Continuous Line Bucket system	Kontinuerlig paternosterverk	System for batchtransport av malm fra havbunnen og opp til havoverflaten. Malmen transporteres i malmskipper (containere) montert på et kabel /

Kategori	Forkortelse Engelsk	Engelsk	Norsk	Forklaring / definisjon
				drag (dybde avgjør hva draget består av, f.eks. stålvaier eller fibertau)
Vertikaltransport		Rigid riser	Stiv riser	En stiv, gjerne stålriser, for vertikaltransport av en fluider med eller uten faststoff
Vertikaltransport		Riser	Stigerør	Et vertikalt rør som brukes for vertikaltransport. Kan kombineres med ulike løsninger for å drive den vertikale strømmen av fluider
Vertikaltransport	RALS	Riser and Lift system	Vertikaltransport-system	Inkluderer pumper og stigerør som bringer malm fra havbunnen til produksjonsstøttefartøyet
Vertikaltransport		Slurry	Slurry	To- til trefase fluid som består av et flytende medium (f.eks. vann), gass og fast stoff. Faststoffandelen vil typisk være 8 til 15 vekt %. Finstoffandelen avhenger blant annet av fragmentstørrelsesfordeling, spesifikk vekt til faststoffet / malmen, design av stigerøret og kapasitet til produksjonssystemet både ned- og oppstrøms.
Vertikaltransport	SSLP	Subsea Slurry Lift Pump	Pumpe for slurryløft	Pumpesystem på eller nær havbunnen. En integrert del av vertikaltransportsystemet. Bidrar til å løfte slurryen opp til produksjonsstøttefartøyet eller annen infrastruktur på havoverflaten.
Vertikaltransport	VTS	Vertical Transportation System	System for vertikaltransport	Generell betegnelse på hele systemet som bidrar til å transportere malm vertikalt fra havbunnen og opp til havoverflaten. Hva et slikt system spesifikt består av er avhengig av systemets design og valg av teknologi (f.eks. bruk av sentrifugalpumper eller gassløft)

Om DNV

Vi er et globalt selskap innen kvalitetssikring og risikohåndtering med tilstedeværelse i over 100 land. Vårt formål er å sikre liv, verdier og miljøet. Med vår unike tekniske ekspertise og uavhengighet bistår vi våre kunder med å forbedre sikkerhet, effektivitet og bærekraft.

Enten vi godkjenner et nytt skipsdesign, optimerer energiproduksjonen fra en vindmøllepark, analyserer sensordata fra en gassrørledning eller sertifiserer verdikjeden til en matprodusent, hjelper vi våre kunder med å ta gode og riktige beslutninger og øke tilliten til virksomheten, produktene og tjenestene deres. Verden er i endring. Vi kan påvirke utviklingen. Sammen skal vi takle de globale utfordringene og omstillingene vi vil møte.