OLJEDIREKTORATET

27. januar 2023 |

Ressursvurdering havbunnsmineraler

Utarbeidet på oppdrag for: Olje- og energidepartementet

Innholdsfortegnelse

1 Sammendrag ... 1
2 Innledning ... 5
2.1 Bakgrunn for Oljedirektoratets arbeid ... 7
2.2 Forutsetninger for ressursvurderingen ... 7
2.3 Metalliske mineraler ... 7
2.3.1 Hovedgrupper av metaller ... 8
2.3.2 Global metallutvinning og reserver ... 8
2.4 EUs behov for kritiske metaller ... 9
3 Oljedirektoratets kartleggingsarbeid ... 13
3.1 Datadekning ... 14
3.2 Dataoppløsning ... 22
4 Geologi og ressurser ... 23
4.1 Sulfidforekomster ... 28
4.1.1 Dannelsen av sulfidforekomster - aktiviteten i aksedalen ... 28
4.1.2 Utbredelsen av sulfidforekomster - prosessene utenfor aksedalen ... 30
4.1.3 Geokjemi og metallgehalt ... 33
4.1.4 Geologisk ressursmodell ... 34
4.1.5 Letemodeller for sulfidforekomster ... 36
4.1.5.1 Volum ... 37
4.1.5.2 Tetthet ... 39
4.1.5.3 Antall forekomster ... 39
4.1.5.4 Metallgehalter ... 42
4.2 Sulfideksempel Mohnsskatten ... 44
4.2.1 Geologi og tektonisk ramme ... 45
4.2.2 Geokjemi og undergrunnsmodell ... 48
4.3 Skorpeforekomster ... 51
4.3.1 Dannelse av fjellandskapet ... 51
4.3.2 Dannelse og vekst av manganskorper ... 54
4.4 Letemodeller for manganskorper ... 60
4.4.1 Volum ... 60
4.4.2 Tetthet ... 65
4.4.3 Metallgehalt ... 65
4.5 Manganskorpe-eksempel sjøfjell nordvest i Grønlandshavet ... 65
5 Metode for beregning av mineralressurser ... 69
5.1 Modelleringsverktøy ... 69
5.1.1 GeoX ... 69
5.1.2 @RISK ... 69
5.1.3 Ranged Approach to Target and Inventory Estimates ... 69
5.2 Metode for beregning av areal med helning over 20 grader ... 70
5.3 Ressursklassifikasjon ... 71
5.3.1 Beskrivelse av ressursklassifiseringssystem ... 72
6 Ressursvurdering ... 75
6.1 Ressursberegning ... 75
6.1.1 Sulfidressurser ... 75
6.1.1.1 Beregningsgrunnlaget ... 75
6.1.1.2 Resultater ... 76
6.1.2 Manganskorpe-ressurser ... 77
6.1.2.1 Beregningsgrunnlaget ... 77
6.1.2.2 Resultater ... 78
6.1.3 Forventede totale ressurser ... 79
6.2 Ressurser i regneeksemplene Mohnsskatten og Sjøfjell ... 80
6.2.1 Mohnsskattens sulfidressurser ... 80

6.2.2 Sjøfjell manganskorperessurser ... 81
6.3 Kunnskapsbehov ... 83
7 Appendiks ... 85
7.1 Andre sulfidforekomster kartlagt av Oljedirektoratet og akademia ... 85
7.1.1 Fåvne ... 85
7.1.1.1 Geologi og tektonisk ramme ... 85
7.1.1.2 Geokjemi og undergrunnsmodell ... 86
7.1.2 Gnitahei ... 87
7.1.2.1 Geologi og tektonisk ramme ... 87
7.1.2.2 Geokjemi og undergrunnsmodell ... 88
7.1.3 Lokeslottet ... 90
7.1.3.1 Geologi og tektonisk ramme ... 90
7.1.3.2 Geokjemi og undergrunnsmodell ... 90
7.2 Tabeller for kaledonske sulfidforekomster ... 92
7.3 Tabeller for gehalter i manganskorper ... 99
7.4 Ressurstabeller for letemodeller og delområder ... 103
7.5 Nærmere om metaller - beskrivelse, utvinning, reserver og ressurser ... 105
7.5.1 Basemetaller ... 106
7.5.2 Edelmetaller ... 106
7.5.3 Spesialmetaller ... 107
7.5.4 Jern, titan og jernlegering ... 110
7.5.5 Andre metaller ... 111
8 Ordliste ... 115
9 Referanser ... 119

Figurer

2.1 Påviste sulfid- og manganskorpeforekomster ... 6
2.2 EU strømmer av innsatsvarer ... 10
3.1 Oversikt over ODs egenopererte tokt og samarbeidstokt i perioden 1999-2021 ... 15
3.2 ODs egenopererte kartlegging ved Mohnsryggen i 2018 ... 17
3.3 ODs egenopererte kartlegging ved Mohnsryggen i 2019 ... 18
3.4 ODs borekampanje i 2020 ... 19
3.5 ODs kartlegging ved Knipovitsjryggen i 2021 ... 20
3.6 Oversikt over dybdedata OD har tilgang til ... 21
4.1 Geologiske hovedtrekk i Nord-Atlanteren ... 23
4.2 Havbunnsspredningen langs Mohnsryggen ... 24
4.3 Havbunnsspredningen mellom Norge og Grønland ... 26
4.4 Snitt av sulfidprøve ... 28
4.5 Geologisk ramme for sulfidforekomster ... 29
4.6 Tektonisk ramme for Mohnsryggens aksedal ... 30
4.7 Mohnsryggens flankevidder ... 31
4.8 Sedimentfordeling på havbunnen ... 32
4.9 Prospektive arealer for modellering av sulfidforekomster ... 33
4.10 Geologisk modell for sulfidforekomst ... 35
4.11 TAG sulfidforekomst ... 35
4.12 TAG blokkmodell ... 36
4.13 TAG tonnasjeberegning ... 36
4.14 Oversikt over grunnstoff analysert for i sulfidvurderingene ... 42
4.15 Mohnsskattens (og Lokeslottets) beliggenhet ... 45
4.16 Forkastningsskrenten ved Mohnsskatten ... 46
4.17 Mohnsskattens beliggenhet i skrenten ... 47
4.18 Mohnsskatt-teigens A- og B-områder ... 47
4.19 Mohnsskatten med soneinndeling ... 48
4.20 Mohnsskatten Modell 1 ... 49
4.21 Mohnsskatten Modell 2 ... 49
4.22 Mohnsskattens dimensjoner ... 50
4.23 Regionale fjellområder i Norskehavet og Grønlandshavet ... 52
4.24 Manganskorpe fra Vøringutstikkeren ... 55
4.25 Marine istidsvifter i Norskehavet og Grønlandshavet ... 57
4.26 Havstrømmer i Norskehavet og Grønlandshavet ... 58
4.27 Oversikt over grunnstoff analysert for i manganskorpe-vurderingene ... 59
4.28 Regionale områder for beregning av manganskorper ... 61
4.29 Data brukt i arealberegningene ... 63
4.30 Sjøfjell beliggende nordvest i Grønlandshavet ... 66
5.1 FNs rammeverk for ressursklassifikasjon ... 72
5.2 CRIRSCO klassifisering ... 72
6.1 Område for ressursberegning for sulfider ... 75
6.2 Område for ressursberegning for manganskorper ... 75
6.3 Sannsynlighetsfordeling for total mengde kobber ... 77
6.4 Sannsynlighetsfordeling for total mengde sink ... 77
6.5 Sannsynlighetsfordeling for total mengde kobolt ... 77
6.6 Sannsynlighetsfordeling for total mengde sølv ... 77
6.7 Sannsynlighetsfordeling for total mengde gull ... 77
6.8 Forventning tilstedeværende metallressurser ... 79
7.1 Fåvne og Gnitahei sine beliggenheter ... 85

7.2 Perspektivkart av Fåvne 86
7.3 Fåvne modellsnitt 87
7.4 Gnitahei modell 1 89
7.5 Gnitahei modell 2 89
7.6 Lokeslottet 90
7.7 Lokeslottet Modell 1 91
7.8 Lokeslottet Modell 2 91

Tabeller

2.1 Sjeldne jordarter (REE) ... 8
2.2 Global utvinning og reserver av utvalgte metalliske mineraler ... 9
2.3 EU kritiske innsatsvarer 2020 ... 10
3.1 Kartleggingsverktøy ... 13
3.2 Oversikt over datatyper der OD har vært delaktig eller har utført kartlegging selv ... 13
3.3 Detaljer fra ODs egenopererte AUV- og ROV-kartleggingstokt ... 14
4.1 Volumtall for modellering av sulfidforekomster - aksialforekomster ... 38
4.2 Volumtall for modellering av sulfidforekomster - flankeforekomster ... 39
4.3 Tetthet for modellering av sulfidforekomster ... 39
4.4 Prospektive arealer, modellering av sulfidforekomster ... 41
4.5 Antall forekomster i hvert delareal, modellering av sulfidforekomster ... 41
4.6 Sum antall forekomster, modellering av sulfidforekomster ... 42
4.7 Aksialmodell, metallgehalt ... 44
4.8 Gruntvannsmodell, metallgehalt ... 44
4.9 Flankemodell med Co, metallgehalt ... 44
4.10 Flankemodell uten Co, metallgehalt ... 44
4.11 Estimert areal på skråninger over 20 grader ... 63
4.12 Oversikt over gjennomsnittlige tykkelsesvariasjoner for manganskorper per regionale område ... 64
4.13 Tetthet (tørr) brukt i modellering av skorpeforekomster ... 65
4.14 Spredning i modellert areal for sjøfjell nordvest i Grønlandshavet ... 67
5.1 Beskrivelse av UNFC-kategoriene G1 til G4 ... 73
6.1 Totale mengder metaller i alle sulfid letemodeller ... 76
6.2 Totale mengder metaller i manganskorper ... 78
6.3 Totale mengder manganskorper i millioner tonn, fordelt på delområde ... 79
6.4 Gehaltstatistikk over utvalgte gehalter i Mohnsskatten ... 81
6.5 Dimensjoner og beregnet sulfid-tonnasje i Mohnsskatten ... 81
6.6 Gehalter og beregnede metall-tonnasjer i Mohnsskatten ... 81
6.7 Forventningsverdier for parametere for sjøfjell i Grønlandshavet ... 82
6.8 Beregnet tilstedeværende ressurser på sjøfjell i Grønlandshavet ... 82
7.1 Hydrotermale sulfidforekomster i skandinavisk del av den kaledonske fjellkjeden; mulige SMS-analoger ... 92
7.2 Kaledonske sulfidmalmforekomster gruppert som i Tabell 7.1. Gjennomsnittstall pr gruppe ... 96
7.3 Tall fra Tabell 1 i Hannington et al. (2010). Kun tall fra midt-oseanrygger er tatt med ... 98
7.4 Gehalter for Jan Mayen-ryggen ... 99
7.5 Gehalter for Ægirbassenget og Jan Mayen-trauet ... 100
7.6 Gehalter for Vøringutstikkeren ... 100
7.7 Gehalter for Lofoten Basin Seamount ... 101
7.8 Gehalter for Greenland Basin Seamount/Greenland Sea East ... 102
7.9 Gehalter for Greenland Sea West ... 102
7.10 Metallmengder i flankemodellen ... 103
7.11 Metallmengder i aksialmodellen ... 103
7.12 Metallmengder i gruntvannsmodellen ... 103
7.13 Skorperessurser på Mohnsryggen ... 103
7.14 Skorperessurser på Knipovitsjryggen ... 104
7.15 Skorperessurser på Jan Mayen-ryggen ... 104
7.16 Skorperessurser på Vøringutstikkeren ... 105

1 Sammendrag

Det har lenge vært kjent at verdenshavenes store dyp inneholder forekomster av metalliske mineraler. Noen steder er forekomstene av en størrelse som kan være økonomisk drivverdig.

Mineralforekomster på havbunnen deles i tre typer; mangannoduler, manganskorper og sulfider. Alle de tre typene inneholder flere metaller (er polymetalliske) og de ligger på store dyp, hovedsakelig mellom 1500 og 6000 meter. På norsk sokkel er det funnet manganskorper og sulfider. Mangannoduler på havbunnen er ikke påvist. Vi har for denne rapporten antatt at forutsetningene ikke er tilstede for dannelse av mangannoduler på grunn av for høy sedimentasjonsrate. Mangannoduler er derfor ikke inkludert i ressursvurderingen.

Bergverksdrift har spilt en viktig rolle i norsk næringsliv siden begynnelsen av 1600-tallet, og er blant de eldste eksportindustriene i landet. Dypmarine sulfidforekomster (SMS - Seabed Massive Sulphides) er sagt å være moderne analoger til landbaserte vulkanogene massive sulfidforekomster (VMS). Flesteparten av kobbersulfidgruvene i Norge har startet sitt liv som skorsteiner på havbunnen.

Oljedirektoratet (OD) har siden 2011 gjennomført datainnsamling i dypvannsområder i Norskehavet og Grønlandshavet i samarbeid med Universitetet i Bergen (UiB), og fra 2020 også i samarbeid med Universitetet i Tromsø (UiT). Data fra ODs kartleggingstokt og samarbeid med vitenskapelige institusjoner er grunnlag for denne ressursvurderingen.

For sulfidforekomster kan kunnskapen om påviste forekomster ekstrapoleres. Det er mange flere inaktive enn aktive forekomster på norsk sokkel. Kunnskap om aktive forekomster er en forutsetning for utforskning av inaktive forekomster. For manganskorper vil havbunnstopografi og alder på underliggende bergarter ha stor betydning for tykkelsen på manganskorpene og dermed for ressursvurderingen.

ODs ressursvurdering spenner opp et utfallsrom for hvor store de tilstedeværende mineralressursene i utredningsområdet kan være. Tilstedeværende ressurser er ressurser som er påvist eller antatt å være tilstede. En del av de tilstedeværende ressursene vil kunne være utvinnbare. Mengden utvinnbare ressurser avhenger av teknologi og økonomi. Det er så langt for lite kunnskap om utvinningsteknologi og utbyggingsløsninger til at det er hensiktsmessig å vurdere malmer og estimere utvinningsgrad.

For sulfider er forventningsverdier for samlede tilstedeværende ressurser:

Forventningsverdier for samlede ressurser for sulfider

Metall	Mengde (i tonn)
Kobber	38 100 000
Sink	45 000 000
Gull	2 317
Sølv	85 200
Kobolt	1 000 000

Mohnsskatten er modellert som et regneeksempel, med forventede tilstedeværende ressurser gitt i tabellen nedenfor. Gjennomsnittlig forekomststørrelse for sulfider er: 40 000 tonn kobber, 47 100 tonn sink, 2,4 tonn gull og 89,3 tonn sølv. Forekomster i flankemodellen er betydelig større enn for aksial- og gruntvannsmodellen.

Forventet ressurstall for en utvalgt sulfidforekomst, Mohnsskatten, modellert som et regneeksempel

Metall	Mengde (i tonn)
Kobber	20 332
Sink	60 326
Gull	6
Sølv	145
Kobolt	313

Prospektivt areal for manganskorpe er anslått å dekke i overkant av 8 500 km^2 av utredningsområdet, med en forventningsverdi for samlede tilstedeværende ressurser på:

Forventningsverdier for samlede ressurser for manganskorper

Metall	Mengde (i tonn)
Mangan	185 000 000
Titan	8 400 000
Magnesium	24 100 000
Litium	229 300
Vanadium	1 918 800
Kobolt	3 058 100
Niob	73 000
Hafnium	14 700
Wolfram	80 300
Gallium	19 200
Scandium	55 800
Yttrium	300 900
Lantan	368 800
Cerium	1 681 200
Praseodym	102 500
Neodym	420 300
Europium	23 200
Gadolinium	99 900
Terbium	15 200
Dysprosium	86 400

Et regneeksempelet på et sjøfjell i Grønlandshavet på 133 km^2 forventes å ha ressurstall på:

Forventet ressurstall for et sjøfjell i Grønlandshavet, modellert som et regneeksempel

Metall	Mengde (i tonn)
Mangan	6 900 000
Titan	270 000
Magnesium	820 000
Litium	9 346
Vanadium	79 080
Kobolt	131 586
Niob	2 913
Hafnium	611
Wolfram	3 414
Gallium	756
Scandium	2 368
Yttrium	12 399
Lantan	14 475
Cerium	71 655
Praseodym	4 067
Neodym	16 600
Europium	926
Gadolinium	4 053
Terbium	614
Dysprosium	3 519

OD vurderer at at de tilstedeværende ressursene er betydelige. For flere av metallene tilsvarer ressursene mange år med global utvinning. De modellerte mengdene er metallinnhold - ikke oksider eller sulfider.

Ressursvurderingen gir en første, samlet vurdering av havbunnsmineraler i utredningsområdet. Datagrunnlaget kan videre styrkes og metodikk for ressursmodellering videreutvikles. Teknologiutvikling, sammen med mer og bedre data, vil forbedre forståelsen av ressurspotensialet og dermed også kvantifiseringen av usikkerheten i ressursanslagene, og gi mulighet for å flytte ressurser til mer modne ressursklasser.

2 Innledning

Det har lenge vært kjent at verdenshavenes store dyp inneholder forekomster av metalliske mineraler. Noen steder er forekomstene av en størrelse som kan være økonomisk drivverdig. Interessen for slike forekomster var en av de viktigste drivkreftene for å forhandle fram Havrettstraktaten i årene 1973-1982, der rettighetene til disse ble regulert.

FNs havrettskonvensjon sier at en kyststat har suverene rettigheter til ressursene på og under havbunnen på landets kontinentalmargin, i hele dens utstrekning – også der kontinentalmarginen strekker seg utover 200 nautiske mil. Havrettskonvensjonen definerer dette området som kyststatens kontinentalsokkel.

Mineralforekomstene deles inn i tre typer; mangannoduler, manganskorper og sulfider. Alle sammen inneholder flere slags metaller (polymetalliske) og de ligger på store dyp, hovedsakelig mellom 1500 og 6000 meter.

- Mangannoduler ligger på bløt bunn på de store havdypene. De inneholder mye mangan og jern med mindre mengder kobber, nikkel, kobolt, titan og platina.
- Manganskorpene inneholder også mest mangan og jern og mindre mengder titan, kobolt, nikkel, cerium, zirkonium og sjeldne jordarter (REE - Rare Earth Elements). Disse vokser som laminerte belegg på fast fjell der det stikker opp på havbunnen, typisk på dyp mellom 1500 og 3000 meter.
- Sulfidene inneholder hovedsakelig bly, sink, kobber, kobolt, gull og sølv. De er knyttet til varme kilder på verdenshavenes vulkanske spredningsrygger der det dannes «svarte skorsteiner» («Black Smokers»). Slike svarte skorsteiner er aktive i noen tusen år før de dør ut og etterlater seg «sulfidhauger» (mounds). Hovedmengden av sulfidmalmressursene ligger i disse haugene.

På norsk sokkel er det funnet manganskorper og sulfider, se Fig. 2.1. Mangannoduler på havbunnen er ikke påvist. Vi har for denne rapporten antatt at forutsetningene ikke er tilstede for dannelse av mangannoduler på grunn av for høy sedimentasjonsrate. Mangannoduler er derfor ikke inkludert i ressursvurderingen.

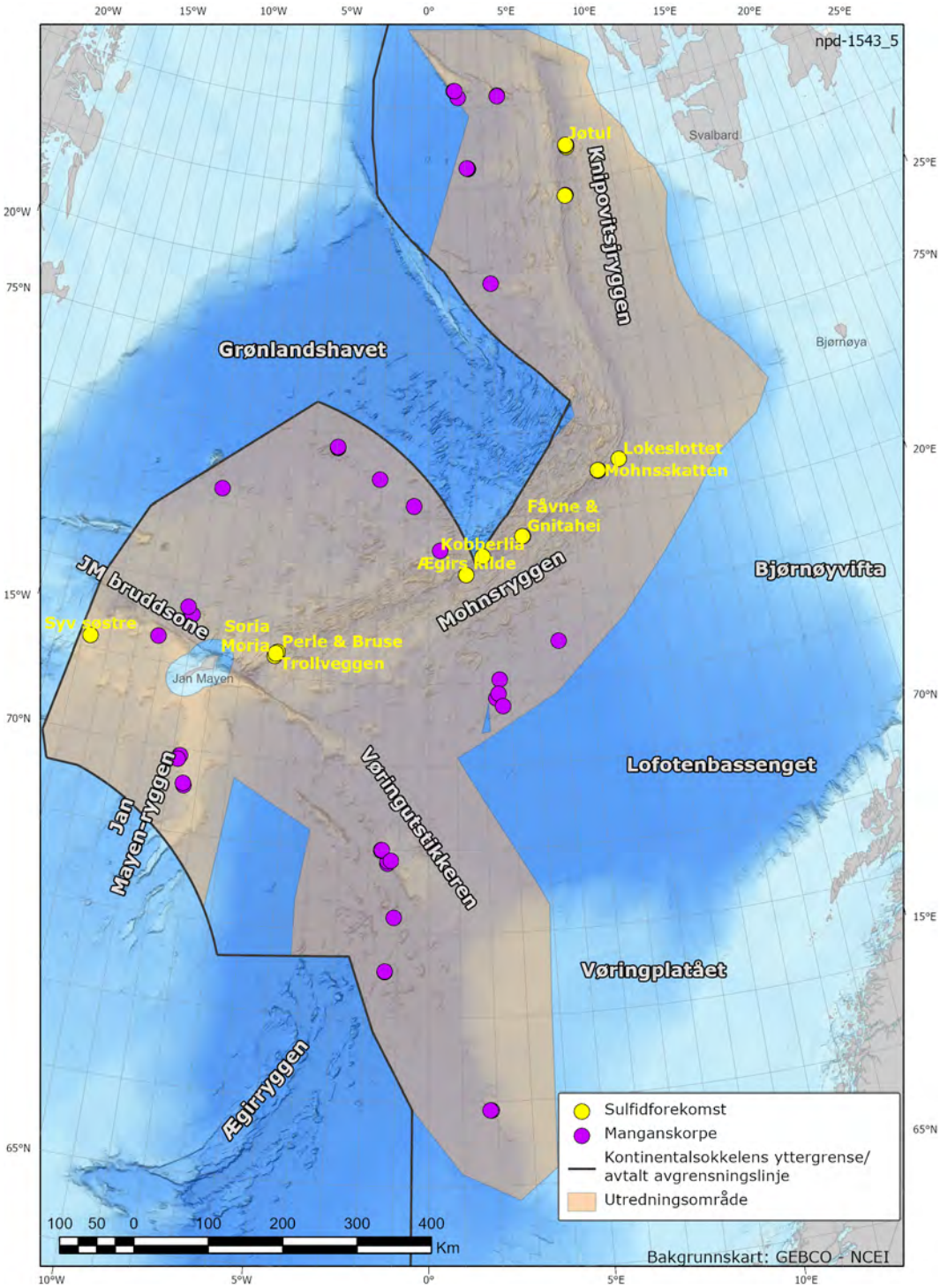

Fig. 2.1 Påviste sulfid- og manganskorpeforekomster
Kart over Norskehavet og Grønlandshavet med påviste hydrotermale sulfidforekomster. Kartet viser også påviste manganskorpe-lokaliteter fra samarbeidstokt mellom Universitetet i Bergen og Oljedirektoratet.

Ifølge Hein et al. (2013) har den økonomiske interessen for de ulike forekomstene ofte dreid seg om nikkel-kobber-mangan (Ni-Cu-Mn) for mangannoduler, kobolt-nikkel-mangan (Co-Ni-Mn) for manganskorpe og kobber-sink-gull-sølv (Cu-Zn-Au-Ag) for sulfidforekomster. Sjeldne jordartene (REE) i skorpeforekomster kan også være mulige produkter fra disse.

2.1 Bakgrunn for Oljedirektoratets arbeid

Olje- og energidepartementet igangsatte, i medhold av havbunnsmineralloven, våren 2020 en åpningsprosess for mineralvirksomhet på norsk kontinentalsokkel. Oljedirektoratet (OD) er gitt i oppdrag å kartlegge de kommersielt mest interessante mineralforekomstene på norsk kontinentalsokkel, og på basis av kartleggingen utarbeide en vurdering av ressurspotensialet. Ressursvurderingen vil inngå som egen del av beslutningsgrunnlaget for åpning av områder for mineralvirksomhet.

2.2 Forutsetninger for ressursvurderingen

Det finnes per i dag ingen spesifikk, akseptert og utbredt modell for ressursvurdering av havbunnsmineraler. ODs ressursvurdering baseres på ODs kartleggingstokt supplert med andre data og vitenskapelig arbeid.

For forekomster av sulfider og skorper hvor det er hentet opp prøver, vil man ha et mineralogisk og geologisk utgangspunkt for ressursvurdering av påviste forekomster. For sulfider kan kunnskapen om påviste forekomster ekstrapoleres langs spredningsaksen og ressurser modelleres for områder med forventet tilsvarende geologiske forutsetninger[1]. I tillegg kan modellerte forekomster ut fra spredningsaksen inkluderes i ressursvurderingen. Det er mange flere inaktive enn aktive forekomster på norsk sokkel. Kunnskap om aktive forekomster er en forutsetning for utforskning av inaktive forekomster. Parametere for den enkelte forekomst, frekvens/avstand mellom forekomster og tykkelse på sedimentoverdekning vil ha stor betydning for ressursvurderingen for sulfider.

For manganskorper vil havbunnstopografi og alder på underliggende bergarter ha stor betydning for tykkelsen på manganskorpene og dermed for ressursvurderingen.

ODs ressursvurdering spenner opp et utfallsrom for hvor store de tilstedeværende mineralressursene i utredningsområdet kan være. Tilstedeværende ressurser er ressurser som er påvist eller antatt å være tilstede. En del av de tilstedeværende ressursene vil kunne være utvinnbare. Mengden utvinnbare ressurser avhenger av teknologi og økonomi. Det er så langt for lite kunnskap om utvinningsteknologi og utbyggingsløsninger til at det er hensiktsmessig å vurdere malmer og estimere utvinningsgrad.

2.3 Metalliske mineraler

Norges geologiske undersøkelse (NGU, 2023) beskriver at bergverksdrift har spilt en viktig rolle i norsk næringsliv siden begynnelsen av 1600-tallet, og er blant de eldste eksportindustriene i landet. Norge har tradisjoner i gruvedrift på en del metaller, som kobber, sink, jern, titan, gull, sølv, bly, niob, vanadium, kobolt og nikkel. Kun titan og jern utvinnes i dag[2].

Mineralutvinning på land i Norge i dag deles etter Direktoratet for mineralforvaltning sin kategorisering (DMF, 2022) i fem mineralgrupper – byggeråstoff, industrimineral, metallisk malm, naturstein og energimineral. Det ble solgt mineraler for 12 867 millioner kroner i 2021. Byggeråstoff var størst med drøyt 54 pst. av den totale salgsverdien, mens industrimineral, metallisk malm, naturstein og energimineral utgjorde hhv. 16 pst., 21

pst., 8 pst. og <1 pst. av total salgsverdi. Eksportverdien på 6 245 millioner kroner utgjorde nesten halvparten av den totale salgsverdien. Mineralnæringen sysselsatte 4 436 årsverk i 2021.

For mineralressurser på land er Direktoratet for mineralforvaltning med Bergmesteren for Svalbard forvalter av råstoffene og for leting og utvinning, mens Norges geologiske undersøkelse er forvalter av geologiske databaser og kunnskap om ressurser i bakken.

Metallisk malm er en betegnelse på bergarter som inneholder metaller med en egenvekt på over 5 gram/cm^3 (Gvein, Rui og Dahl, 2022). For at en forekomst skal kunne defineres som en malm må det være en naturlig forekommende, økonomisk brytbar konsentrasjon av et mineral som kan brukes til metallfremstilling (NGU, 2023).

2.3.1 Hovedgrupper av metaller

Metalliske mineraler inneholder metaller. Metaller defineres kjemisk som elementer/ grunnstoff som lett avgir elektroner (danner positive ioner), og danner metallbindinger (NGU, 2023). En enklere definisjon er at metaller er skinnende, duktile (myke og bøyelige), smibare og gode elektriske ledere. Metalliske malmer opptrer vanligvis i form av oksider (bundet til oksygen) eller sulfider (bundet til svovel og oksygen), og deles av NGU inn i følgende hovedgrupper:

- Basemetaller (kobber, sink, bly, arsen, antimon, vismut og tinn)
- Edelmetaller (gull, sølv og platinagruppens elementer)
- Spesialmetaller (niob, tantal, hafnium, beryllium, litium, yttrium, scandium og sjeldne jordartselementer)
- Jern, titan og jernlegeringsmetaller (jern, mangan, titan, krom, nikkel, kobolt, vanadium, molybden og wolfram)
- Energimetaller (uran og thorium)
- Andre metaller (Cs, Ga, Ge, In, Cd, Hg, Re, Rb, Se, Si, Sr, S, Te, Tl, Zr, Al, Mg og metalliske elementer med andre bruksområder enn til metallformål: Ba, K, Ca, Na, Rb.

Tab. 2.1 Sjeldne jordarter (REE)

Sjeldne jordarter er en samlebetegnelse for grunnstoffene scandium og yttrium i gruppe 3 i periodesystemet, i tillegg til de 15 lantanoidene. Alle de sjeldne jordartene er metaller. De sjeldne jordartene er (i stigende rekkefølge etter atomnummer): scandium, yttrium, lantan, cerium, praseodym, neodym, promethium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium og lutetium. Betegnelsen kommer av at man lenge mente at disse grunnstoffene kun finnes i små og vanskelig tilgjengelige mengder i naturen. For de fleste gjelder dette fremdeles, men noen av dem, for eksempel yttrium, cerium, lantan og neodym, forekommer i større mengde i jordskorpen enn for eksempel bly. Sjeldne jordarter brukes som legering- eller dopingstoffer i teknologiske materialer og elektronikk for å lage materialer med spesifikke ønskede elektriske og magnetiske egenskaper[3]. Gielen, D. and M. Lyons (2022) deler de sjeldne jordartene opp i lette elementer (LREE) og tunge elementer (HREE) basert på atomnummer. Lantan, cerium, praseodym, neodym, promethium, samarium, europium og gadolinium kategoriseres som LREE. Terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium og lutetium kategoriseres som HREE.

2.3.2 Global metallutvinning og reserver

U.S. Geological Survey utarbeider årlig publikasjonen Mineral commodity summaries (U. S. Geological Survey, 2022), med oversikt over bl.a. global utvinning og globale reserver for ulike metaller. Tall for utvinning (primærproduksjon) og reserver i 2020 i Tab. 2.2 er i

all hovedsak hentet herfra. Tall for utvinning av sjeldne jordarter er hentet fra Minor Metals Trade Association (MMTA, 2022). Se 7.5 Nærmere om metaller - beskrivelse, utvinning, reserver og ressurser for detaljer og kilder.

Tab. 2.2 Global utvinning og reserver av utvalgte metalliske mineraler

Grunnstoff	Global utvinning (tonn)	Globale reserver (tonn)
Kobber (Cu)	20 600 000	880 000 000
Sink (Zn)	12 000 000	250 000 000
Bly (Pb)	4 400 000	90 000 000
Gull (Au)	3 030	54 000
Sølv (Ag)	23 500	530 000
REE*	240 000	120 000 000
Yttrium (Y)	8 000-12 000	>500 000 (Y2O3)
Scandium (Sc)	2	
Litium (Li)	82 500	22 000 000
Titan (Ti)** (TiO2)	8 600 000	750 000 000
Kobolt (Co)	142 000	7 600 000
Mangan (Mn)	18 900 000	1 500 000 000
Vanadium (V)	105 000	24 000 000
Magnesium (Mg)	1 000 000	Tilnærmet uendelig og vidt spredt
Niob (Nb)	67 700	17 000 000
Hafnium (Hf)		
Wolfram (W)	78 400	3 700 000
Gallium (Ga)	327	
Lantan (La)	12 500	6 000 000
Cerium (Ce)	24 000	
Praseodym (Pr)	2 500	2 000 000
Neodym (Nd)	35 000	8 000 000
Europium (Eu)	270	
Gadolinium (Gd)	7 500	1 000 000
Terbium (Tb)	10	
Dysprosium (Dy)	2 500	

* Tonn REO - Rare Earth Oxide, ** Titandioksid fra ilmenitt og rutil

2.4 EUs behov for kritiske metaller

Europakommisjonen (Kommisjonen) presenterte sist i 2020 sin oversikt over kritiske innsatsvarer, herunder kritiske metaller (European Commission, 2020a). Oversikten oppdateres hvert tredje år, og følges også av en fremskrivning av behovet for kritiske innsatsvarer i 2030 og 2050.

Økonomisk betydning og forsyningsrisiko er hovedkriterier for å fastsette kritikalitet for EU. Økonomisk betydning ser i detalj på hvor viktig enkelte innsatsvarer er for industriell fremstilling av sluttprodukter. Forsyningsrisiko ser på geografisk konsentrasjon i utvinning

og forsyning til EU, styresett i leverandørland inkl. miljøspørsmål, muligheter for resirkulering og gjenbruk som alternativ, substitusjon, EUs importavhengighet og handelsrestriksjoner i tredjeland.

Kommisjonens liste for 2020 inneholder 30 innsatsvarer, sammenlignet med 14 i 2011, 20 i 2014 og 27 i 2017. Bauksitt, litium, titan og strontium er nye på 2020-listen. Helium tas ut, mens nikkel overvåkes utenfor listen pga. økt etterspørsel som innsatsvare for batterier.

Tab. 2.3 EU kritiske innsatsvarer 2020

antimon	**bauksitt**	barytt	beryllium	bor
flusspat	fosfatstein	fosfor	gallium	germanium
grafitt	hafnium	indium	kobolt	**litium**
magnesium	metallurgisk kull	naturgummi	niob	platinumgruppe metaller
scandium	silisium	sjeldne jordarter, lette	sjeldne jordarter, tunge	**strontium**
tantalum	**titan**	vanadium	vismut	wolfram

Kommisjonens fremskrivning av behovet for kritiske innsatsvarer i 2030 og 2050 beskriver behovet i et 2050 klimanøytralt scenario (European Commission, 2020b). Kommisjonen vektlegger at EUs behov må sees i en global sammenheng, der befolkningsvekst, industrialisering, dekarbonisering av transport, energisystemer og andre industrielle sektorer, økende etterspørsel fra fremvoksende økonomier og nye teknologiske anvendelser, alle medfører økt etterspørsel etter kritiske innsatsvarer. For metaller viser Kommisjonen til OECDs anslag om en etterspørselsvekst på 150 pst. frem til 2060. EU er 75-100 pst. importavhengig for de fleste metaller.

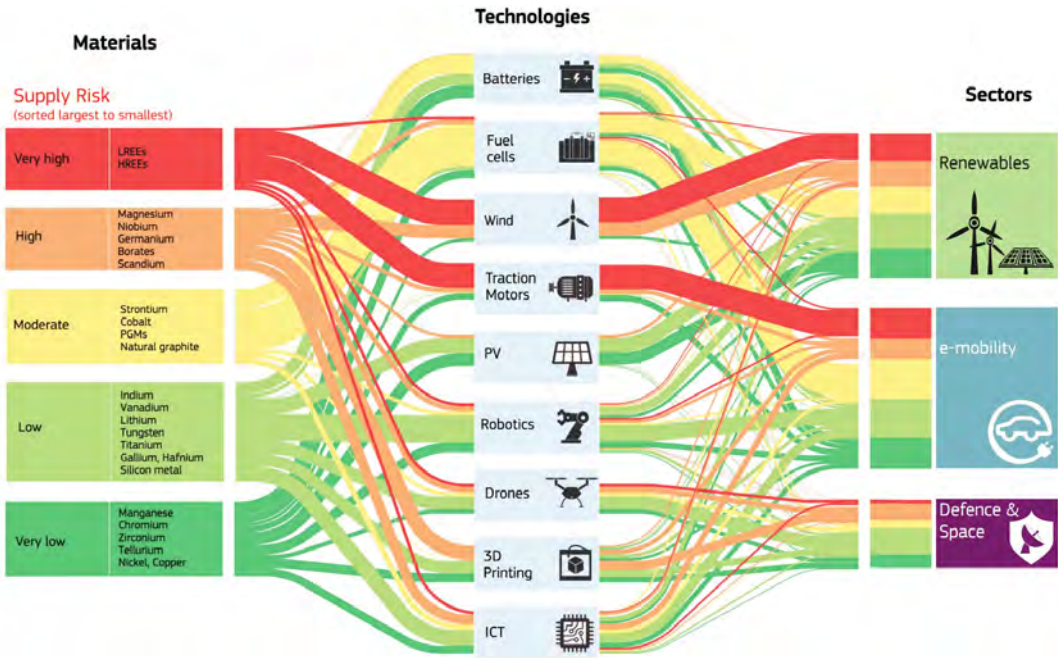

Fig. 2.2 EU strømmer av innsatsvarer
Semi-kvantitativ fremstilling av strømmer av innsatsvarer og deres nåværende forsyningsrisiko for ni utvalgte teknologier og tre sektorer. Kilde: Europakommisjonen

1 Forekomster på land gir også viktig kunnskap. Dypmarine sulfidforekomstene er sagt å være moderne analoger til landbaserte vulkanogene massive sulfid- (VMS) forekomster. I Norge har mineralutvinning av basemetaller på land historisk vært drevet på VMS-forekomster. Flesteparten av kobbersulfidgruvene i Norge har startet sitt liv som skorsteiner på havbunnen. Det gjelder blant annet gruvene på Løkken og Røros i Trøndelag, og Visnes på Karmøy i Rogaland.

2 Per 2015 var det i Norge hovedsakelig drift på jerntitanoksidet ilmenitt (Sokndal, Rogaland) og jernoksidet hematitt (Rana, Nordland). Disse bearbeides til høyt spesialiserte produkter og brukes til andre formål enn metallproduksjon. De siste årene har også vært noe drift på molybden (Knaben, Vest-Agder).

3 sjeldne jordarter (2022) i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra: https://snl.no/sjeldne_jordarter (Hentet 12. desember 2022).

3 Oljedirektoratets kartleggingsarbeid

Oljedirektoratet (OD) sitt kartleggingsarbeid tilknyttet havbunnsmineraler omfatter bruk av en rekke datatyper av både nyere og eldre dato. For eksempel er batymetriske data innsamlet for arbeidet relatert til avgrensing av Norges yttergrenser i 1999/2000 brukt som grunnlagsdata for ODs dedikerte kartleggingsoperasjoner i 2018 og 2019.

En generell fremgangsmåte for ODs kartleggingsarbeid har vært bruk av skipsbasert batymetrisk data-innsamling for å få et overordnet bilde av havbunnen. Deretter har AUV-innsamling blitt utført for å gi et mer detaljert bilde, etterfulgt av ROV-operasjoner for å dokumentere og hente opp prøvemateriale av havbunn. OD har også gjennomført boreoperasjoner på sulfidforekomster ved bruk av kveilerørsteknologi.

Tab. 3.1 Kartleggingsverktøy

Verktøy	Forklaring
MBES (Multi Beam Echo Sounder)	Multistråle ekkolodd som gir topografiske kart over havbunn, også kalt batymetriske data eller dybdedata. Innsamlet fra båt gir dette oppløsning på kart i størrelsesorden 30-100 m.
AUV (Autonomous Underwater Vehicle)	Autonome undervannsfarkoster som utfører en rekke målinger både på havbunn og i vannsøylen. Kan også samle inn MBES og da med oppløsning på cm til 1 m.
ROV (Remotely Operated Vehicle)	Undervannsrobot som opererer på havbunn og som er styrt fra båten. Kan både utføre målinger og samle inn havbunnsmateriale.

Kartleggingstokt som OD har gjennomført har vært basert på anbudsprosesser, hvor internasjonale og nasjonale aktører har utført oppdrag. Samarbeidstoktene med Universitetet i Bergen (UiB) og Universitetet i Tromsø (UiT) har blitt utført gjennom samarbeidsavtaler, hvor Norges forskningsskip har blitt benyttet.

Tab. 3.2 gir informasjon om de ulike datatypene som er benyttet for datainnsamling i forbindelse med ressursvurderingen. De geofysiske dataene som er samlet inn er tilgjengeliggjort og kan bestilles hos OD.

Det arbeides med å systematisere havbunns- og kjernemateriale med mål om at det tilgjengeliggjøres på tilsvarende måte som kjerner fra letebrønner for petroleum.

Tab. 3.2 Oversikt over datatyper der OD har vært delaktig eller har utført kartlegging selv

År/ansvarlig	Data	Område	Tilgjengeliggjort	Oppløsning (MBES)
1999/00 - OD	MBES (skipsbasert)	Norskehavet	X	Nær 100 m
2008 - UiB	MBES (skipsbasert)	Mohnsryggen	X	Nær 100 m
2010 - OD	MBES (skipsbasert)	Jan Mayenryggen	X	Nær 100 m
2011 - OD/ UiB	ROV	Jan Mayenryggen		
2012 - OD/ UiB	ROV	Jan Mayenryggen		
2013 - OD/ UiB	MBES (skipsbasert)	Vøringutstikkeren	X	Nær 50 m

2016 - UiB/ OD	AUV	Mohnsryggen	X	1-2 m
2017 - UiB/ OD	AUV	Mohnsryggen	X	1 -2m
2018 – UiB/ OD	MBES (skipsbasert) og ROV-MBES inkl. prøvetaking	Mohnsryggen	X	Nær 50 m og 1 m
2018 - OD	AUV og ROV	Mohnsryggen	X	3 cm
2019 – UiB/ UiB	AUV og MBES	Mohnsryggen	X	1 m
2019 - OD	AUV og ROV	Mohnsryggen	X	1 m
2020 - OD	Kjerneboring	Mohnsryggen		
2020 – UiB/ OD	MBES (skipsbasert)	Mohnsryggen	X	Nær 50 m
2020 – UiT/ OD	MBES (skipsbasert)	Knipovitsjryggen	X	Nær 50 m
2021 - OD	AUV og ROV	Knipovitsjryggen	X	0,5 m
2021 – UiT/ OD	MBES (skipsbasert)	Knipovitsjryggen	X	Nær 50 m
2021 – UiB/ OD	MBES (skipsbasert) og ROV-MBES inkl. prøvetaking	Mohnsryggen	X	Nær 50 m og 1-2 m
2022 – UiB/ OD	MBES (skipsbasert) og ROV-MBES inkl. prøvetaking	Mohnsryggen		Nær 50 m og 1-2 m
2022 – UiB/ OD	MBES (skipsbasert) og ROV-MBES inkl. prøvetaking	Knipovitsjryggen		Nær 50 m og 1-2 m
2022 – Atlab3	Seismikk og Elektromagnetiske målinger	Mohnsryggen		

Tab. 3.3 Detaljer fra ODs egenopererte AUV- og ROV-kartleggingstokt

År	AUV - operativt	Sensor for AUV	ROV-dykk	Operative døgn	Datamengde innsamlet	Km/ dag	Km/ dag/ AUV
2018	1 Hugin 3000	HiSAS, SSS, SP, Magnetometer (SCM), SBP, MBES, Geokjemi (CH4, turbiditet, pH, ORP), Video	10	16 døgn	750 km	47	47
2019	3 Hugin 6000	SSS, SP, Magnetometer (SCM), SBP, MBES, Geokjemi (CH4, turbiditet, pH, ORP), Video	5	17 døgn	3868 km	227	76
2021	2 Hugin 6000	SSS, SP, Magnetometer (SCM), SBP, MBES, Geokjemi (turbiditet, pH, ORP), Video	4	13 døgn	2200 km	169	85

3.1 Datadekning

ODs kartapplikasjon «Deep Sea Surveys» er vist i Fig. 3.1 og gir en geografisk oversikt over kartleggingstoktene som OD har vært involvert i. Dette omfatter multistråle ekkolodds-data (MBES) helt tilbake fra 1999 og fremover i sentrale deler av Norskehavet, deler av Jan Mayen mikrokontinent, Vøringsutstikkeren, Mohnsryggen, deler av Grønlandshavet og Knipovitsjryggen.

OD har i senere år prioritert kartlegging over områder som ut ifra dagens kunnskap har størst potensial for interessante mineralforekomster.

Innenfor utredningsområdet er det 280 000 km^2 havbunn som ikke er dekket med skipsbasert MBES-data. Dette tilsvarer 47 pst. av utredningsområdet. I disse områdene er kartgrunnlaget satellittdata og oppløsningen på kart som viser havbunn i størrelsesorden 200-500 meter.

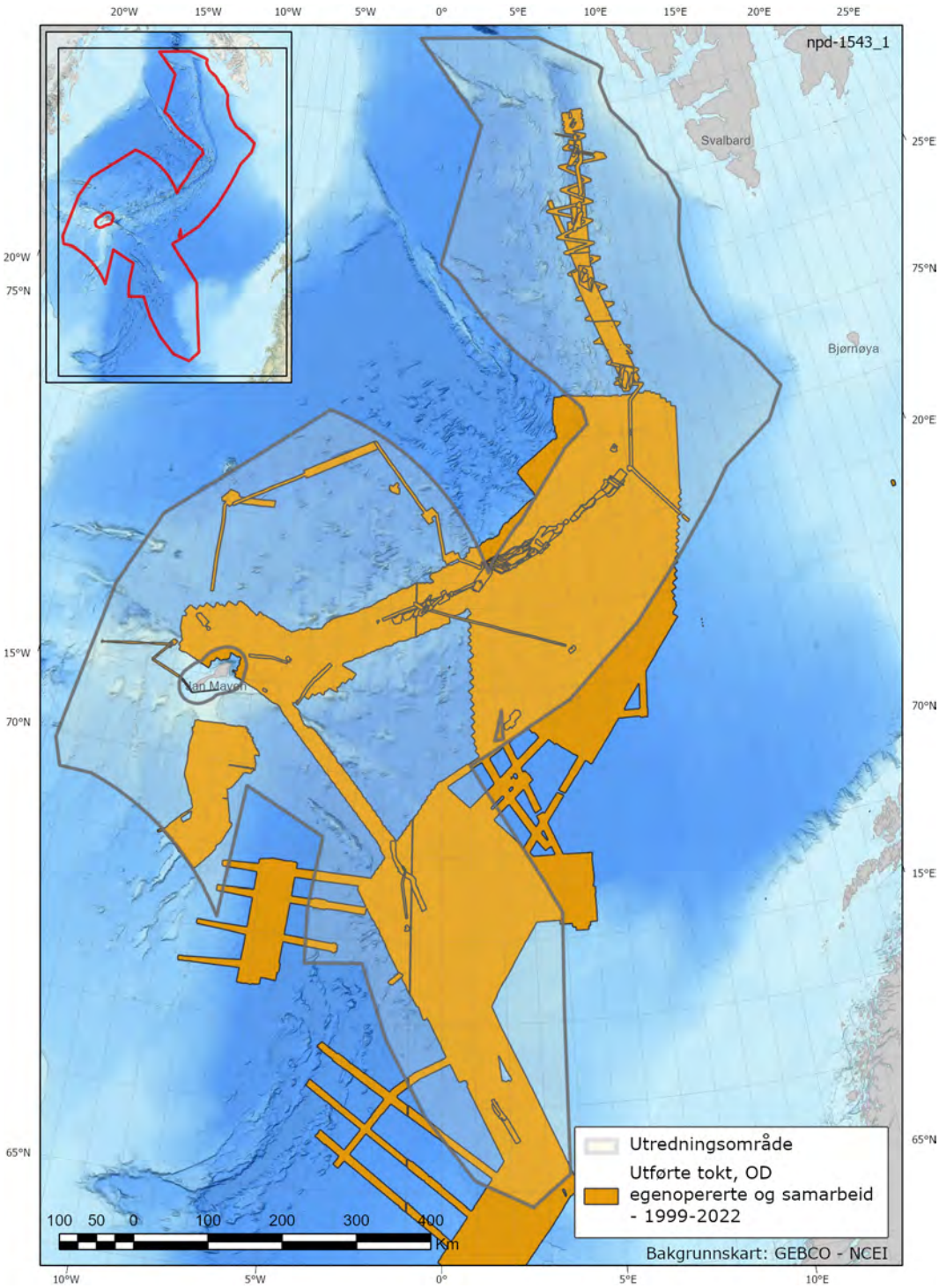

Fig. 3.1 Oversikt over ODs egenopererte tokt og samarbeidstokt i perioden 1999-2021

Samarbeidstokt med UiB

OD har siden 2011 gjennomført datainnsamling i dypvannsområder i Norskehavet i samarbeid med UiB. Kunnskapsinnhenting både innenfor geologi og biologi har hatt

fokus, i all hovedsak med bruk av forskningsfartøyet G.O. Sars. Materiale fra havbunnen har blitt hentet opp med bruk av Kystdesign Aegir 6000 ROV, og kartlegging av havbunnen har blitt utført med bruk av Kongsberg Maritime Simrad EM 302/710 MBES. Data fra samarbeidstokt med UiB har vært sentrale som grunnlagsdata for gjennomføring av ODs egenopererte tokt ved Mohnsryggen og Knipovitsjryggen i 2018-2021.

Samarbeidstokt med UiT

Bedre oppløsning på kartgrunnlaget for havbunnen ved Knipovitsjryggen var nødvendig før OD skulle gjennomføre et større kartleggingstokt med bruk av AUV i 2021. Multistråle-ekkoloddsdata ble hentet inn med forskningsfartøyene Kronprins Haakon og Helmer Hanssen i 2020 og 2021, i samarbeid med UiT. FF Kronprins Haakon er utstyrt med Kongsberg Maritime Simrad EM302/710 MBES og Helmer Hanssen EM302.

Samarbeidstoktene med akademia har gitt en bedre forståelse for utbredelsen av manganskorpe og økt kunnskap om sulfidavsetninger på norsk kontinentalsokkel.

Samarbeidstokt med Atlab 3

Kartlegging av lagrekker like under havbunnen var ODs mål med deltakelse i det vitenskapelige prosjektet Atlab 3 i 2022, et prosjekt ledet av Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Geofysiske metoder kjent fra kartlegging av de grunnere deler av kontinentalsokkelen ble tilpasset og testet ut i de dypere deler av sokkelen. En tidlig versjon av Atlab3-data bekrefter de storskala geologiske trekk som ODs geologiske modeller bygger på.

ODs egenopererte tokt i 2018

ODs egenopererte tokt i 2018 var direktoratets første tokt for å kartlegge potensialet for havbunnsmineraler. Kartleggingen ble gjennomført uten samarbeidspartnere, men erfaringer fra tidligere samarbeid med UiB var nyttig for planleggingen. Området som ble valgt ut var en mindre del av Mohnsryggen, og for kartlegging av havbunn ble det benyttet én AUV og én ROV. Oppdragstaker var selskapet Swire Seabed, hvor AUV'en som ble benyttet var Kongsberg Maritime Hugin 3000 og ROV'en var av typen Schilling HD23.

Totalt 750 linjekilometer med AUV-data ble samlet inn, 10 ROV-dykk ble gjennomført og en ny aktiv sulfidforekomst ble funnet, «Fåvne».

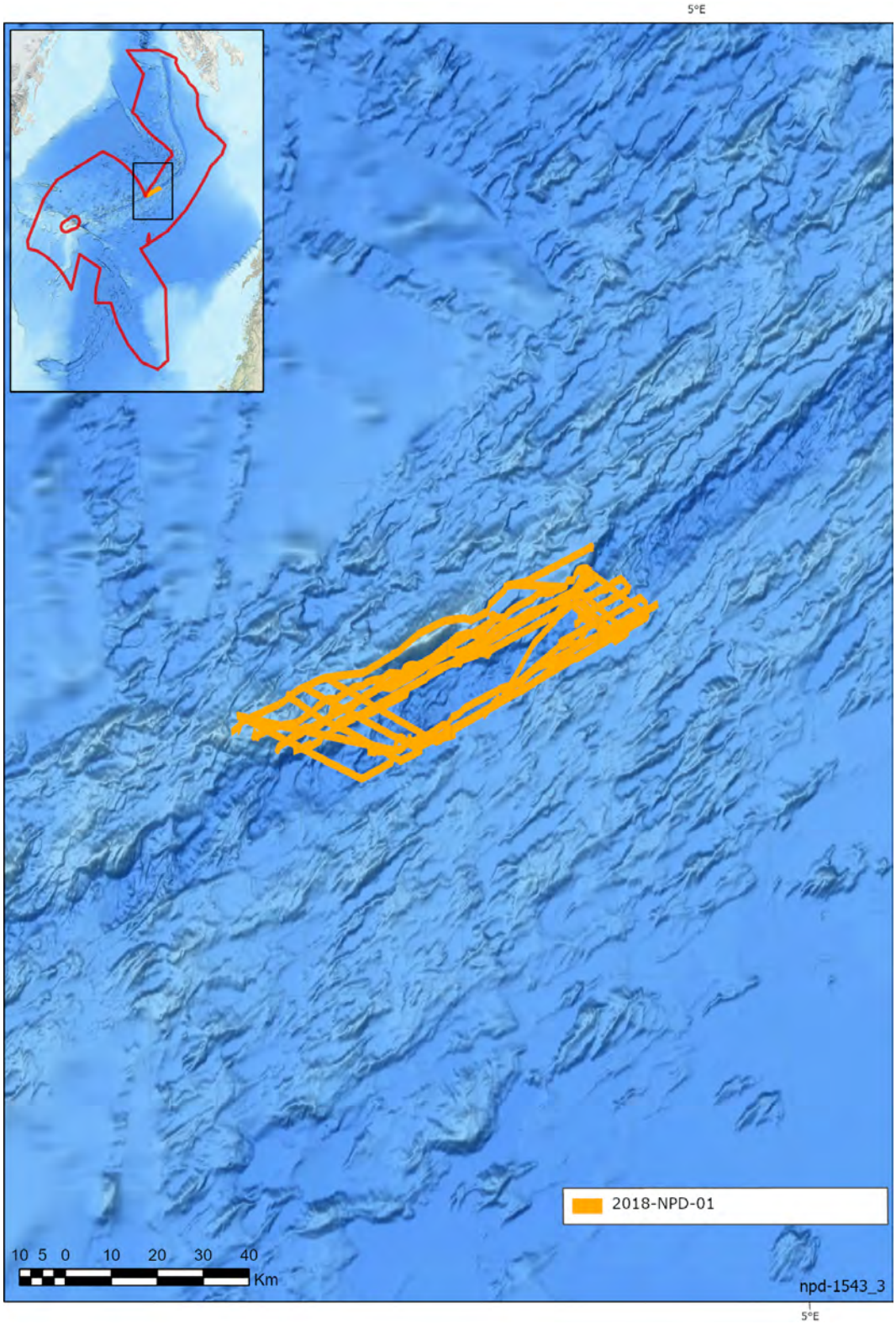

Fig. 3.2 ODs egenopererte kartlegging ved Mohnsryggen i 2018

ODs egenopererte tokt i 2019

Erfaring fra kartleggingstokt i 2018 var sentralt for planleggingen av 2019-toktet. Blant annet ble det nå valgt å benytte tre AUV'er som opererte samtidig. Området ved

Mohnsryggen som ble kartlagt var en forlengelse fra 2018-kartleggingen. Selskapet Ocean Infinity utførte oppdraget for OD, og AUV av typen Kongsberg Hugin 6000 og ROV Kystdesign KD31 ble benyttet til datainnhenting.

Totalt 3800 linjekilometer med AUV-data ble hentet inn, og det ble gjennomført 5 ROV-dykk. En ny inaktiv sulfidforekomst, «Gnitahei», ble funnet, og sulfidforekomsten «Mohnsskatten» ble verifisert.

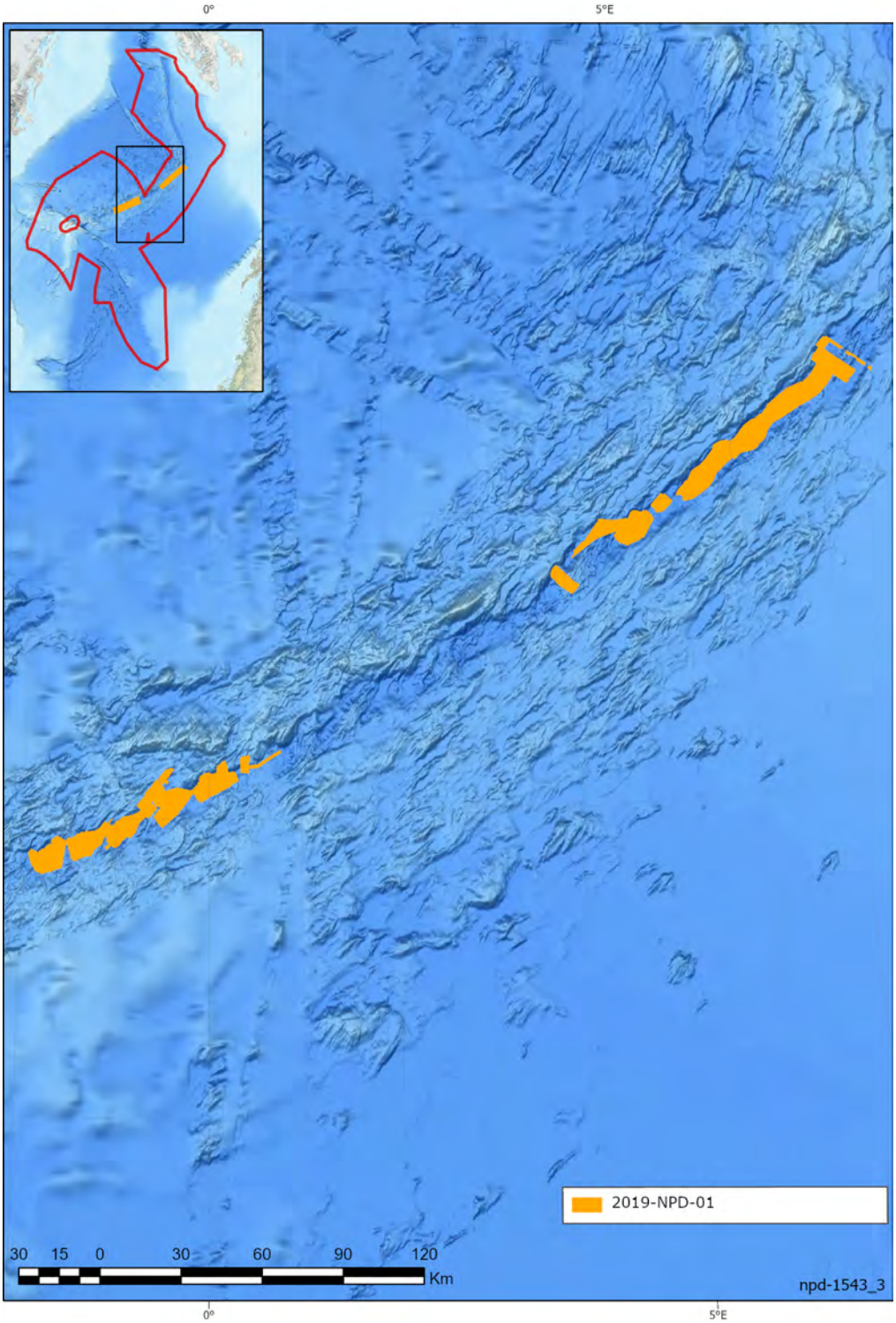

Fig. 3.3 ODs egenopererte kartlegging ved Mohnsryggen i 2019

ODs egenopererte tokt i 2020

ODs kartlegging i 2018 og 2019 gav informasjon om sulfidavsetninger på havbunnen, men det var til nå ingen kunnskap om sulfidmektigheter i undergrunnen på norsk sokkel. Økt forståelse for utstrekning av sulfidavsetninger under havbunn var dermed mål for ODs kjerneboreoppdrag i 2020. Oppdraget skulle gjennomføres ved kartlagte sulfidforekomster ved Mohnsryggen. Selskapet TIOS vant anbudskonkurransen og utførte oppdraget sammen med Halliburton, Island Offshore og Oceaneering. Kjernemateriale ble hentet opp både ved Fåvne og Gnitahei (sørlig gul sirkel på Fig. 3.4) og «Mohnsskatten» (nordlig gul sirkel på Fig. 3.4) ved bruk av kveilerørsteknologi.

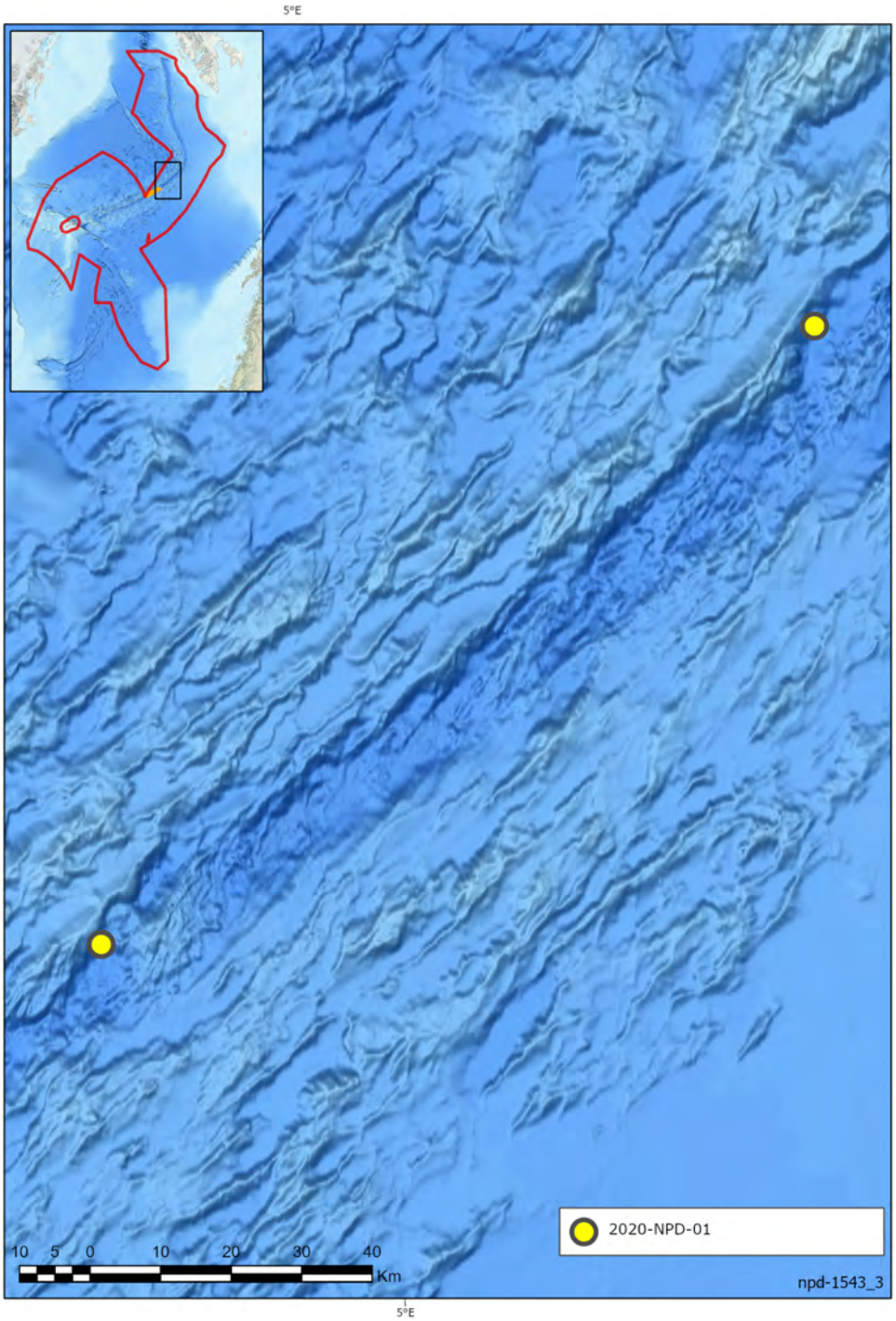

Fig. 3.4 ODs borekampanje i 2020

ODs egenopererte tokt i 2021

OD prioriterte i 2020 å øke forståelsen for Knipovitsjryggen ved å samle inn MBES-data sammen med UiT. Disse dataene var grunnlagsdata for ODs AUV- og ROV-kartlegging i 2021 i denne delen av utredningsområdet. Ocean Infinity utførte oppdraget for OD, og fartøyet som ble benyttet var mobilisert med tre AUV'en av typen Kongsberg Maritime Hugin 6000, og én Schilling WROV 150 utførte tre ROV-dykk. Kartleggingen resulterte i anomalier på innsamlet datasett – men disse ble på grunn av dårlig vær ikke nærmere undersøkt.

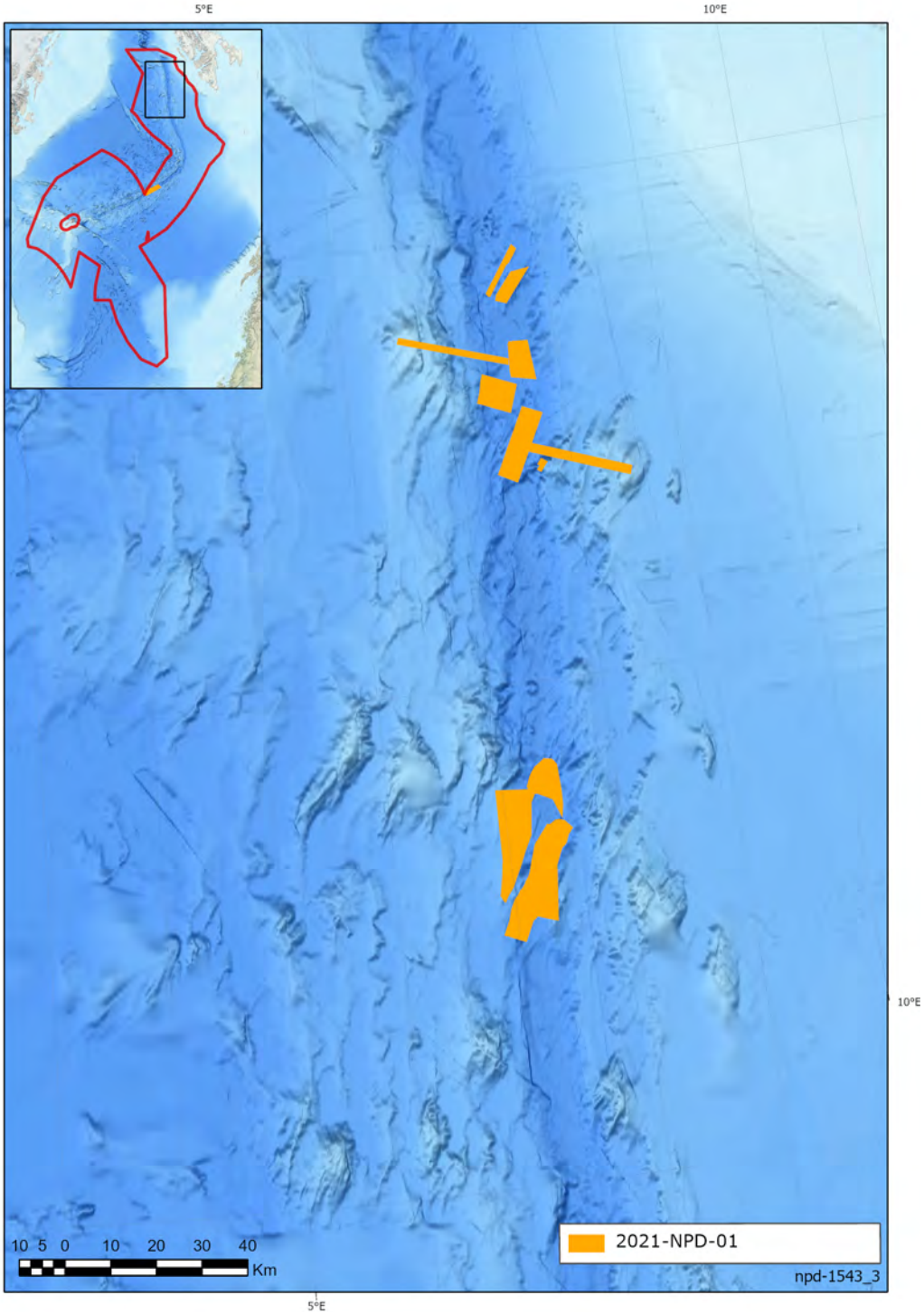

Fig. 3.5 ODs kartlegging ved Knipovitsjryggen i 2021

Data fra andre

MBES-datasett fra de akademiske institusjonene GIN RAS og Marum har blitt benyttet til å komplettere kartgrunnlaget for Knipovitsj-området, mens datasett fra kartleggingsprogrammet Mareano og transittlinjer fra Marum-tokt på tilsvarende måte har blitt benyttet for Grønlandshavet og Lofotbassenget. Disse vitenskapelig innsamlede datasettene har generelt sett en oppløsning på nær 50 m.

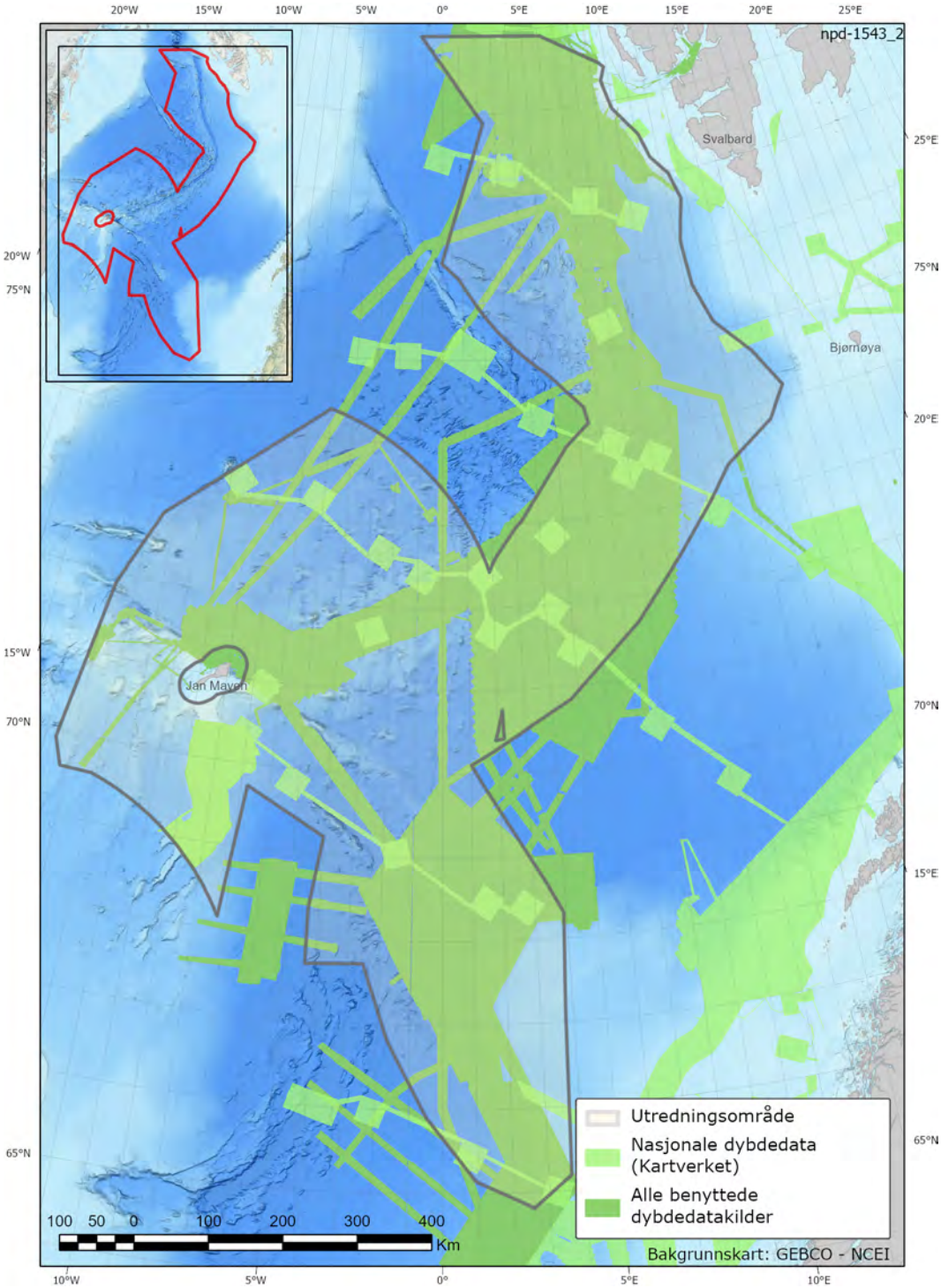

Fig. 3.6 Oversikt over dybdedata OD har tilgang til

3.2 Dataoppløsning

Batymetriske data innsamlet med bruk av AUV gir en oppløsning på dybdedata i størrelsesorden 1 cm til 1-2 m. Oppløsning er avhengig av flere faktorer, blant annet flyhøyde over havbunn og type påmontert sensor for innsamling.

Batymetriske data innsamlet fra skip gir en kartoppløsning fra 30 m til 100 m. Havdyp, topografi, hastighet for datainnsamling og fokus for ekkoloddsstråle er med å styre oppløsning på innsamlede havdypsdata.

Batymetriske data innsamlet med ROV gir en oppløsning på dybdedata på cm-nivå.

Skipsbasert MBES-data som eksisterer innenfor utredningsområdet er generelt sett målt i henhold til versjon av S-44 standard, utgitt av "International Hydrograpic Organization". For inngående prosesseringsdetaljer henvises til datainnsamler.

Havbunnstopografiske data (MBES) som er brukt i denne rapporten vurderes å ha god kvalitet, og tilstrekkelig for kartleggingsarbeidet som OD har utført.

4 Geologi og ressurser

Jordklodens ytre skall, litosfæren, er delt opp i plater (litosfæreplater) som «flyter» rundt på mantelen i jordens indre og derved beveger seg i forhold til hverandre. Det er dette som er jordens platetektonikk. Havområdene mellom Norge og Grønland er en del av Atlanterhavet, som er et resultat av denne platetektonikken.

For omtrent 300 millioner år siden var verdens kontinenter samlet i ett superkontinent, Pangea. Superkontinentet begynte deretter å sprekke opp og det ble dannet nye litosfæreplater; og nye verdenshav, deriblant Atlanterhavet. Kontinent-oppsprekkingen og åpningen av Atlanterhavet startet sørfra mellom Afrika og Sør-Amerika i juratiden, og migrerte deretter nordover. For 55 millioner år siden nådde oppsprekkingen våre breddegrader, og havområdet mellom Norge og Grønland begynte å åpne seg – med den amerikanske litosfæreplaten i vest og den eurasiske litosfæreplaten i øst.

Dette havområdet utgjør den nordligste delen av den midt-atlantiske havbunnsspredningen og består av de tre spredningssegmentene Kolbeinseyryggen, Mohnsryggen og Knipovitsjryggen. En regional, oseansk bruddsone, Jan Mayen-bruddsonen, deler dette havområdet på tvers av spredningsryggene, med Kolbeinseyryggen på sørsiden og Mohnsryggen og Knipovitsjryggen på nordsiden (Fig. 4.1).

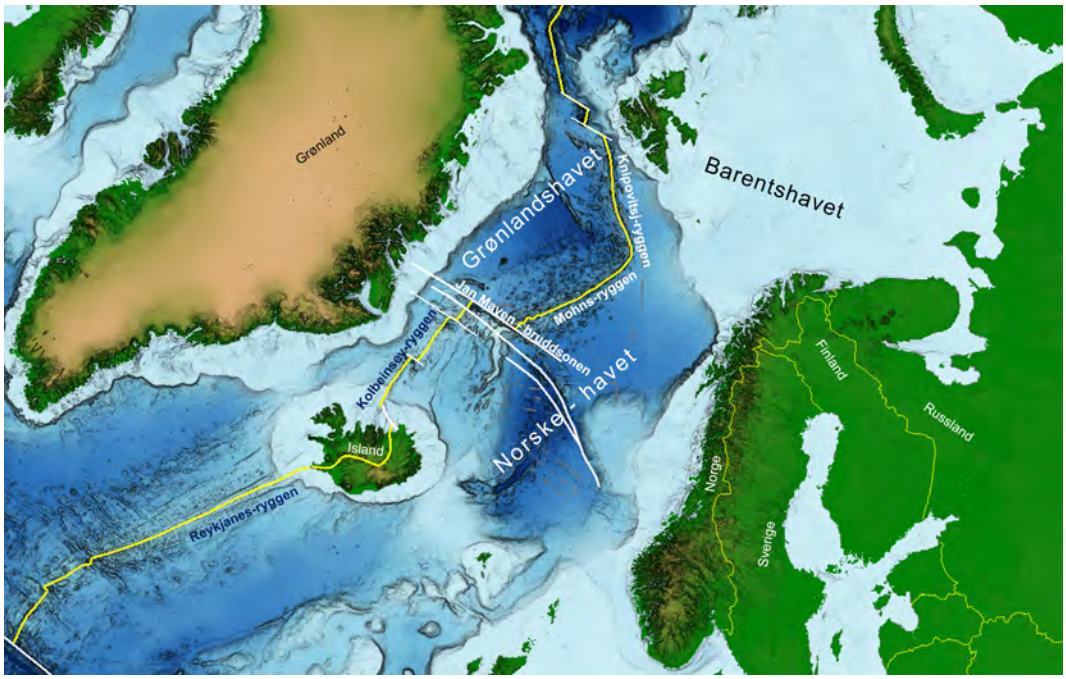

Fig. 4.1 Geologiske hovedtrekk i Nord-Atlanteren
Kartfiguren viser de geografiske og geologiske hovedtrekkene i den nordlige delen av Atlanterhavet. Dybdeforholdene er vist med sjatteringer i blått og er basert på det globale havdypsgridet SRTM 30 v8. Aksen for midthavsryggene der den aktive havbunnsspredningen foregår er vist med gul linje, og de viktigste segmentene er navngitt i hvit og blå skrift. De viktigste oseanske bruddsonene er markert med hvite linjer.

Langs Mohnsryggen, i området mellom Jan Mayen-bruddsonen og Barentshavsranden, har havbunnsspredningen etterlatt seg en havbunn med et regelmessig landskap av fjellrygger parallelt med aksedalen i spredningsryggen. Denne symmetrien gjenspeiler seg også i mønsteret av de magnetiske spredningsanomaliene i området (Fig. 4.2).

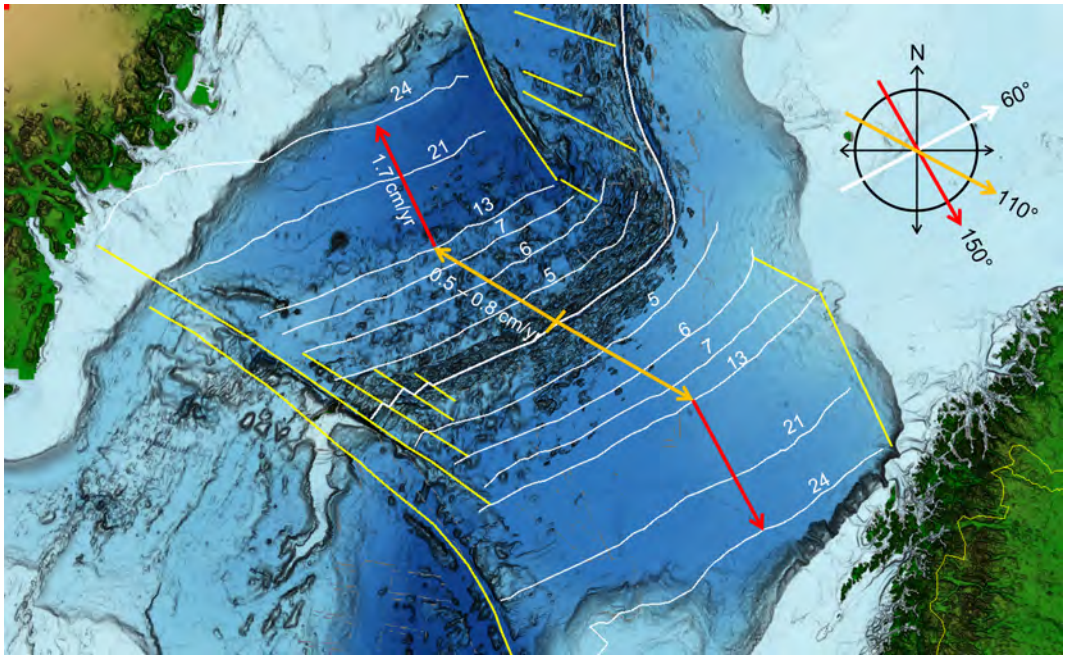

Fig. 4.2 Havbunnsspredningen langs Mohnsryggen
Batymetrisk kart som viser sammenhengen mellom spredningsanomaliene, og hastighet og retning for havbunnsspredningen langs Mohnsryggen i Norskehavet og Grønlandshavet. De viktigste, magnetiske spredningsanomaliene er vist med hvite linjer og er nummerert i henhold til den internasjonale standard. De viktigste, oseanske bruddsonene er vist med gule linjer. Anomali 24 ble dannet ved kontinentoppsprekningen for 55 millioner år siden, mens anomali 13 ble dannet på den tiden den relative platebevegelsen mellom den amerikanske og den eurasiske endret seg (33 millioner år siden). Anomali 6 markerer begynnelsen på havbunnsspredningen langs Knipovitsjryggen (ca 20 millioner år siden). De røde pilene viser retningen på havbunnspredningen mellom anomali 24 og 13. Denne var på 150 grader som vist med rød pil i kompassrosen, og var vinkelrett på aksedalen. I denne perioden var spredningshastigheten på ca 1,7 cm/år. Ved anomali 13 skiftet spredningsretningen til ca 110 grader (oransje pil) og hastigheten sank til 0,5 - 0,8 cm/år. Dette var, og er, skrått på aksedalens retning som er på ca 60 grader (hvit pil). Dagens aksedal (0 millioner år) er markert som den sentrale, hvite linjen.

Magnetiske spredningsanomalier kommer av at jordens magnetfelt endrer seg ved at de magnetiske polene bytter plass (reversering av polariteten). Dette skjer hyppig med ujevne mellomrom gjennom geologisk tid (i snitt ca. hvert 0,5-1,0 millioner år). Selve skiftet skjer raskt, omtrent 5000 år. Sist det skjedde var for ca. 770 000 år siden (Haneda et al., 2020).

Basaltiske bergarter inneholder mye magnetiske mineraler. I en basaltisk smelte (lavastrømmer og gangintrusjoner) vil disse mineralene stille seg inn etter den gjeldende polretning og låses i den retningen når bergarten er kjølt ned til under 600-300 °C. På denne måten vil de vulkanske bergartene i en aksedal registrere og bevare jordens magnetiske polaritet fra den tiden aksedalen var aktiv. Over tid viser dette seg som et mønster med striper (anomalier) parallelt med aksedalen med vekselvis normal og reversert magnetisk polaritet ut til hver side av dalen. I likhet med årringene i et tre kan man da bestemme alder på havbunnen lokalt ved å gjenkjenne og telle disse anomalistripene utover fra aksedalen. De anomaliene som er kraftigst og lettest å gjenkjenne, vil være de viktigste for å få en oversikt over den geologiske utviklingen av et havområde.

Havbunnspredningen langs Mohnsryggen har foregått i to perioder siden anomali 24. Denne anomalien markerer kontinentoppsprekkingen for 55 millioner år siden. Havbunnsspredningen foregikk deretter vinkelrett på anomaliretningen (150 grader)

med 1,7 cm per år til hver side fram til anomali 13 (33 millioner år siden) (Fig. 4.2). Fra anomali 13 endret spredningsretningen seg til 110 grader og spredningshastigheten sank til 0,5-0,8 cm per år (Dauteuil og Brun, 1996; Mosar et al., 2002). Dette har holdt seg frem til i dag. Retningen på aksedalen (og dermed retningen på spredningsanomaliene) har derimot holdt seg på 60 grader helt siden oppsprekkingen for 55 millioner år siden og synes å representere en stabil tektonisk trend i mantelen nedarvet fra kontinentoppsprekkingen. Dermed står dagens spredningsretning skrått på aksedalen med ca. 30-40 grader fra vinkelrett (Fig. 4.2). Spredningsprosessen innebærer kontinuerlig dannelse av bruddsoner i jordskorpen i aksedalen. Disse bruddene opptrer som ekstensjonsforkastninger som utvikler seg normalt på spredningsretningen, og stryker dermed 30-40 grader på skrått over aksedalen. Denne ekstensjonsprosessen utløser også vulkanske sprekke-utbrudd som bygger opp aksiale vulkanrygger langs disse forkastningene. De aksiale vulkanryggene utgjør derved korte spredningssegmenter som er bundet sammen av overføringssoner i et sikk-sakk-mønster som fordeler spredningen (ekstensjonen) langs aksedalen (Pedersen et al., 2010a).

Taktskiftet i havbunnspredningen som skjedde ved anomali 13 (33 millioner år siden) førte til en endring i oppbygningen av havbunnsskorpen. Skorpen som ble dannet langs Mohnsryggen etter anomali 13 ligger 300 – 400 meter grunnere enn den som ble dannet før. Dette kan sees som et markant trinn i havdypet opp til anomali 13 (Fig. 4.8).

Den sørligste delen av Mohnsryggen er delt opp av mindre bruddsoner i tre små segmenter der aksedalen er orientert mer eller mindre normalt på spredningsretningen (Fig. 4.2). I dette området ser man spor av denne aksedalsretningen helt ut til anomali 6 til hver side. Dette området ligger betydelig grunnere enn resten av spredningsryggen nordover (2000-600 meters dyp) på grunn av økt magmatisk oppbygning av skorpen. Disse forholdene skyldes at dette området ligger i ytterkanten av den store varmepunktsdiapiren i mantelen under Island, og påvirkes sterkt av denne (Pedersen et al., 2010a).

Inntil anomali 13 ble åpningsbevegelsen i dette havområdet overført sidelengs inn i Polhavet via en kontinental bruddsone langs Barentshavsranden, kalt de Geer-sonen. Denne sonen utgjorde del av plategrensen mellom den amerikanske og den eurasiske platen. Endringen av spredningsretning og hastighet ved anomali 13 skjedde på grunn av en justering i den relative bevegelsen mellom disse to platene. Dette førte antagelig til at sidelengs-bevegelsen langs plategrensen også fikk en ekstensjons-komponent som førte til strekking og tynning av den kontinentale jordskorpen langs de Geer-sonen. Nyere data indikerer at for ca 20 millioner år siden (ved ca anomali 6) førte dette til endelig oppsprekking av jordskorpen og separasjon av kontinentene. Knipovitsjryggen begynte da å åpne seg ved spredning mellom de to platene langs de Geer-sonen (med en ekstremt skeiv spredningsretning) (Dumais et al. 2021). Denne prosessen førte også til at sterkt strukket kontinentskorpe utgjør underlaget i et område langs østsiden av Grønlandsryggen (Gernigon et al., 2020; se også Zayonchek & Brekke et al., 2011; Gusev, 2015).

I området sør for Jan Mayen-bruddsonen og nord for en ryggstruktur fra Grønland over Island til Færøyene (GIFR) (Hjartason et al., 2017) har havbunnspredningen foregått svært komplisert og usymmetrisk (Fig. 4.3). Spredningsprosessen og åpningen av havområdet har foregått i to faser. I den første fasen forgikk spredningen langs Ægirryggen vest for Island og Jan Mayen fra åpningen for 55 millioner år siden (ved anomali 24) til ca. 20-25 millioner år siden (mellom anomali 6 og 7). Fram til anomali 13 foregikk spredningen kontinuerlig, men deretter sank spredningshastigheten betydelig.

Samtidig begynte Kolbeinseyryggen å overta en del av spredningen og utviklet seg som en kile inn langs Grønland fra sør. Kontinentalskorpen der begynte å sprekke opp og en mindre del av den ble skilt fra resten av Kolbeinseyryggen, som omtrent ved anomali 6 overtok all havbunnsspredning mellom Grønland og Norge sør for Jan Mayen-bruddsonen. På grunn av denne spredningsprosessen har det fraskilte skorpefragmentet beveget seg vekk fra Grønland og utgjør i dag et område med kontinentskorpe midt mellom Norge og Grønland. Dette regnes nå som et eget mikrokontinent, Jan Mayen-kontinentet. Hvordan Kolbeinseyryggen ble etablert er omdiskutert. Tidlige modeller antar at det til å begynne med fantes en midlertidig, kortere spredningsrygg som styrte fraskillingen av mikrokontinentet fra Grønland, og at den aller sørligste delen av mikrontinentet muligens kunne strekke seg til under nordøstligste del av dagens Island (Talwani og Eldholm, 1977; Brekke, 2000). Nyere modeller antar en jevn utvikling av Kolbeinsyryggen fra starten av (Gernigon et al., 2015; Blischke et al., 2022). I begge modellene inngår det at kontinentskorpen, på den sørlige delen av mikrokontinentet, er tynn og strukket ut over et bredt område, med et havdyp på ca 2000 meter. Mot nord er ikke skorpen strukket på langt nær i samme grad, slik at kontinentfragmentet der blir betydelig smalere og tykkere og har form som en smal, langstrakt, grunn rygg (JMR i Fig. 4.3). I forlengelsen av denne ryggen mot nord ligger øya Jan Mayen med vulkanen Beerenberg.

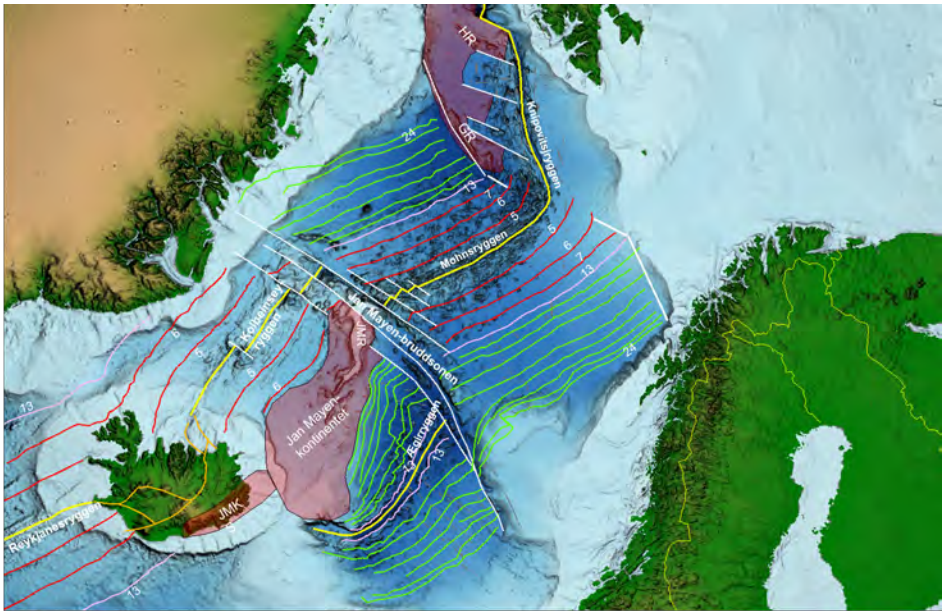

Fig. 4.3 Havbunnsspredningen mellom Norge og Grønland
Kartfiguren viser en oversikt over de geologiske hovedelementene i havbunnsspredningen mellom Norge og Grønland nord for Island. Aksene i de aktive og inaktive spredningsryggene er vist med gule linjer. Havbunnspredningen gjennom Island går langs definerte vulkanske og seismiske soner - disse er vist med oransje linjer. Spredningsanomali 13 (tiden for skiftet i relative platebevegelser) er vist med rosa linjer. Spredningsanomalier eldre enn anomali 13 er vist med grønne linjer, og spredeningsanomalier som er yngre enn anomali 13 er vist med røde linjer. De viktigste anomaliene er nummeret. Spredningsanomaliene er tatt fra Wessel and Müller (2018). Områdene med kontinentskorpe i Jan Mayen-kontinentet og langs Grønlandsryggen er vist som gjennomsiktige polygoner med rød farge. Avgrensingen av kontinentskorpeområdene er gjort på grunnlag av NGUs publiserte datasett over magnetiske anomalier (se Olesen et al., 2010; Gernigon et al., 2015), med støtte i Gernigon et al. (2020) og Dumais et al. (2020). Anomalimønsteret viser tydelig den vifteformede spredningen langs Ægirryggen fram til da spredningshastigheten sank betraktelig etter anomali 13. Etter adskillelsen av Jan Mayen-kontinentet fra Grønland var Kolbeinseyryggen fullt etablert ved anomali 6. Langs Mohnsryggen viser anomaliene en stort sett symmetrisk spredning, selv om hastighet og retning endret seg noe ved anomali 13, da Ægirryggen begynte å dø ut. Spredningsmønsteret langs Knipovitsjryggen er komplisert og foreløpig ikke inkludert (se Dumais et al., 2020).

Den betydelige strekkingen og utvidelsen av kontinentskorpen i den sørlige delen av Jan Mayen-kontinentet foregikk samtidig med havbunnsspredning langs Ægirryggen. Mangelen på strekning og utvidelse i den nordlige delen av kontinentet ble kompensert ved at spredningen langs Ægirryggen fikk en vifteform med mest spredning nordover (Fig. 4.3). En grundig analyse basert på nyere spredningsanomalidata og geokjemiske data (Torsvik et al., 2015) viser at sterkt strukket kontinental skorpe ligger i en forlengelse av Jan Mayen-kontinentet under den østligste delen av Island (JMKS i Fig. 4.3).

Gjennomgangen over viser at jordskorpens opprinnelse, sammensetning, tykkelse og topografi varierer i stor grad i disse havområdene. Jordskorpens beskaffenhet har direkte innvirkning på dannelse og utvikling av de ulike havbunnsmineralene og har derfor stor betydning for vurderinger og beregninger av ressurspotensialet. Hvordan disse variasjonene påvirker ressursvurderingen er beskrevet i mer detalj videre i kapittelet.

4.1 Sulfidforekomster

Sulfidforekomster er sulfidforbindelser mellom svovel og metallgrunnstoffer avsatt som sulfidmineraler. Siden de inneholder flere typer metallgrunnstoffer, kalles de polymetalliske. Slike sulfidforekomster er av de viktigste kildene til metaller som kobber, sink, bly, kobolt, sølv og gull.

4.1.1 Dannelsen av sulfidforekomster - aktiviteten i aksedalen

De polymetalliske sulfidforekomstene (Fig. 4.4) dannes av hydrotermale prosesser drevet av magmatisk aktivitet i aksedalen i en spredningsrygg. På norsk kontinentalsokkel gjelder det Knipovitsjryggen, Mohnsryggen og nordlig del av Kolbeinseyryggen. Sulfidforekomstene her kan deles i to typer, alt etter hvilken tektonisk posisjon de har i aksedalen i spredningsryggene: flankeforekomster og aksialforekomster. Dette er også grunnlaget for inndelingen av forekomstene i to hoved-letemodeller (se 4.1.5 Letemodeller for sulfidforekomster).

Fig. 4.4 Snitt av sulfidprøve
Sulfidprøve fra Mohnsskatten hentet opp fra 2800 meters vanndyp med ROV i 2020.

Flankeforekomstene dannes langsetter de store hovedforkastningene som utgjør flankene av aksedalen. Aksialforekomstene dannes i vulkanske rygger som utvikles i de sentrale deler av aksedalen. Ryggene dannes ved sprekke-erupsjoner som er knyttet til bruddannelse i jordskorpen, og disse bruddene dannes ortogonalt til spredningsretningen. De vulkanske ryggene utgjør derved korte spredningssegmenter som er definert av vulkanrygger omgitt av dypere, langstrakte bassenger. På grunn av det skrå spredningsmønsteret forflyttes disse ortogonale spredningssegmentene sidelengs. Dette skjer langs overføringssoner. Disse går på tvers av aksedalen. Sett i detalj følger aksedalen dermed et sikk-sakk mønster, der ortogonale spredningssegmenter knyttes sammen av overføringssonene (se Pedersen et al., 2010a).

Både hovedforkastningene langs flankene og de aksiale forkastningene går gjennom den øvre, sprø delen av havbunnskorpen ned til dypene der skorpen er duktil og tildels gjennomsatt av magmakamre med smeltet masse. Bevegelser på disse forkastningene gir sprekkesystemer som stedvis i perioder åpner for sirkulasjon av hydrotermale væsker, og dermed avsetning av polymetalliske sulfider (Fig. 4.5).

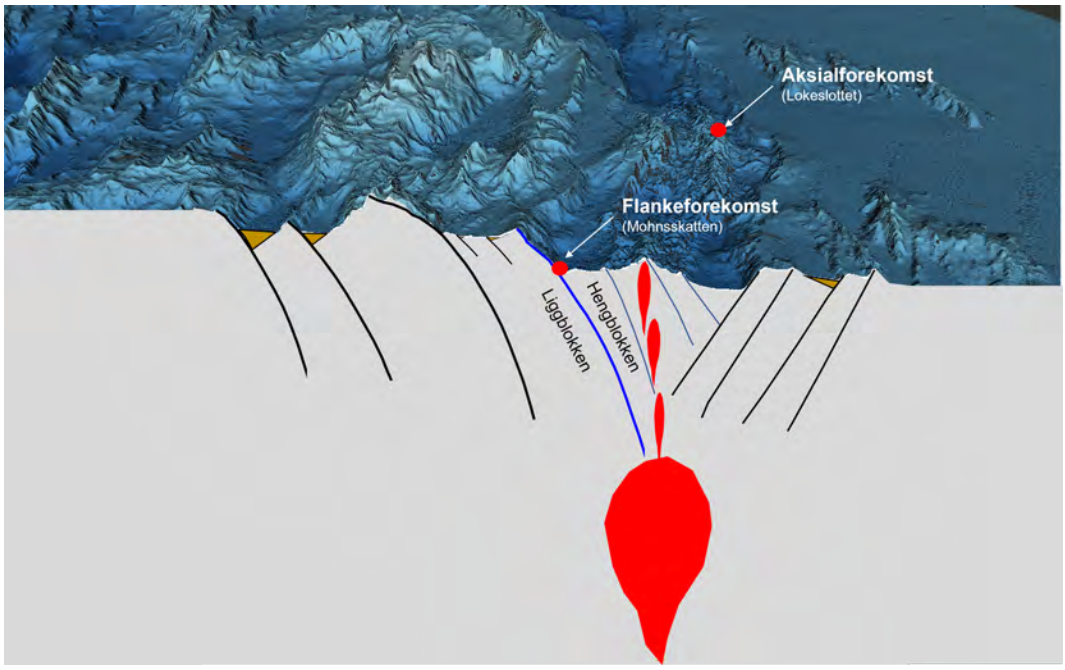

Fig. 4.5 Geologisk ramme for sulfidforekomster
Perspektivkart over nordligste del av Mohnsryggen. Figuren er en kombinasjon av havbunnstopografien og et snitt av jordskorpen, som viser sammenhengen mellom skorpeprosessene i aksedalen og avsetningen av de to typene sulfidforekomster; aksialforekomstene langs aksiale vulkanrygger og flankeforekomstene langs de store flankeforkastningene. Et gruntliggende magmakammer som tilfører aksedalen lava er vist i rødt. Sedimentavsetninger i halvgrabenene utover fra flankene av aksedalen er vist som brune kiler. Figuren viser også prinsippet for liggblokken og hengblokken til en forkastning. Liggblokken er den blokken som ligger fast under forkastningsplanet, mens hengblokken er den blokken som sklir nedover oppå forkastningsplanet. I figuren er dette illustrert langs det blå forkastningsplanet. I et system av paralelle forkastninger vil liggblokken til én forkastning utgjøre hengblokken til den neste, underliggende forkastning.

Flankeforekomstene finnes både langs foten av forkastningene (eks. Fåvne, se 7.1.1 Fåvne) og oppe i forkastningsskrenten (eks. Gnitahei og Mohnsskatten, se 7.1.2 Gnitahei og 4.2 Sulfideksempel Mohnsskatten). Forekomstene ved foten av forkastningene kan ligge helt nede i, og på tvers av, overgangen mellom liggblokken og hengblokken (overgangen mellom skrenten og dalbunnen, se Fig. 4.5). Alle flankeforekomster følger med liggblokken og vil med tiden løftes sammen med skrenten opp og ut av aksedalen. De flankeforkastninger som så langt er undersøkt i Mohnsryggens aksedal har kun eksponert basalt. Ultramafiske bergarter kan til dels opptre i dypere deler av jordskorpen og inngå i reaksjonssonen i den hydrotermale prosessen uten at de er eksponert på overflaten. Noen flankeforkastninger som er aktive over spesielt lang tid vil kunne utvikle såkalte kjernekomplekser, der også mantelen med de ultramafiske bergartene blir eksponert. Slike forkastninger synes ikke å være, eller å ha vært, dominerende i våre deler av det atlantiske spredningssystemet — men flere kandidater er beskrevet (Pedersen et al., 2007; Reimers, 2020). Aksedalen i Mohnsryggen er asymmetrisk der forkastningene langs nordvestflanken er størst. Flankeforekomstene oppdaget i Mohnsryggen til nå, ligger alle i den nordvestlige flanken. Det er ikke dokumentert at dette har sammenheng med denne asymmetrien, men skyldes heller at det er den nordvestlige flanken som et blitt mest undersøkt. UiB har påvist sulfidrike lag i en kjerne

tatt nær den sørøstre flanken. Kilden til dette laget er trolig en forekomst som har rast ut ved denne flanken. Ved anslag av antall forekomster langs aksedalen må man derfor ta hensyn til at den sør-østre flanken er underrepresentert.

Den samme asymmetrien ser ikke til å være utviklet i Knipovitsjryggen.

Aksialforekomstene forekommer både sentralt og på flankene av de aksiale vulkanryggene (eks. Lokeslottet og Ægirs kilde). Retningen på aksedalen går skjevt på spredningsretningen. De aksiale vulkanryggene og de tilhørende, tverrgående forkastningene går derfor på skrå over aksedalen (Fig. 4.6) (se også 4 Geologi og ressurser).

Mohnsskatten er nærmere beskrevet i eger avsnott (4.2 Sulfideksempel Mohnsskatten). De øvrige kjente sulfidforekomstene på norsk kontinentalsokkel er beskrevet i mer detalj i appendiks (Appendiks 7.1 Andre sulfidforekomster kartlagt av Oljedirektoratet og akademia).

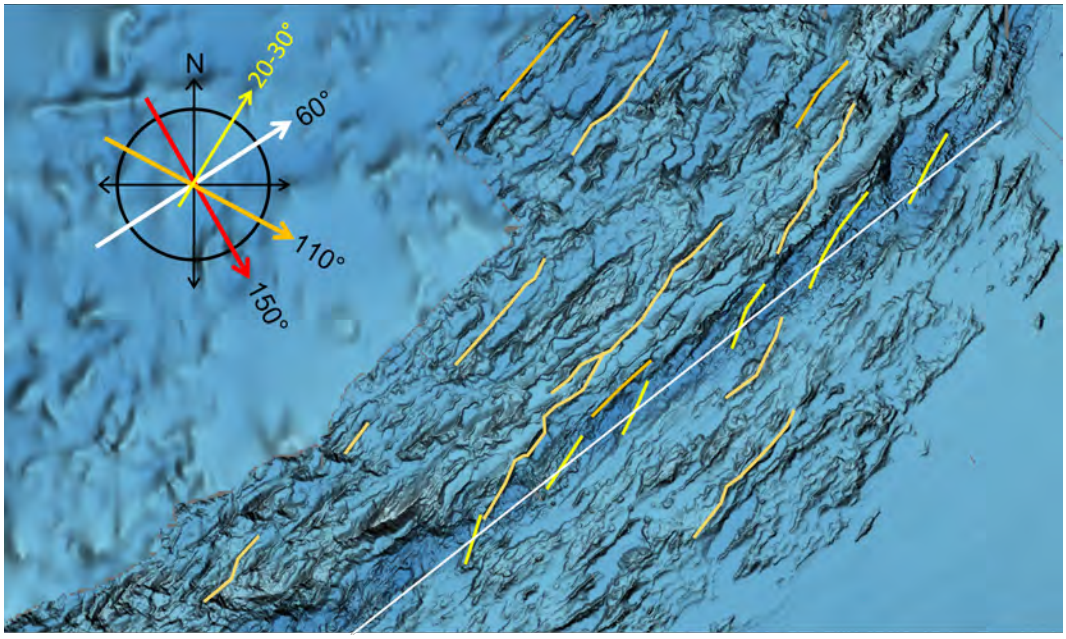

Fig. 4.6 Tektonisk ramme for Mohnsryggens aksedal
Batymetrisk kart som viser sammenhengen mellom havbunnsspredningen og ekstensjonsforkastningene. Den hvite linjen går langs aksen av aksedalen med kompassretning på 60° som vist med den hvite pilen. Spredningsretningen er på 110° og vist med den oransje kompasspilen. Dette fører til ekstensjonsforkastninger vinkelrett på denne spredningsretningen som antydet med de gule og oransje linjene; de gule viser aktive forkastninger i den aksedalen, mens de oransje viser noen av de gamle, passive ekstensjonsforkastningene utover på flankene. Ekstensjonsforkastningene avviker med 30 – 40° fra retningen på aksedalen (som ville vært forkastningsretningen hvis spredningen hadde foregått vinkelrett på aksedalen som vist med rød kompasspil).

4.1.2 Utbredelsen av sulfidforekomster - prosessene utenfor aksedalen

Forkastningene langs flankene av aksedalen vil over tid bli inaktive og nye flankeforkastninger blir utviklet langs noen av de store forkastningene assosiert med de aksiale vulkankompleksene. Dette ser ut til å skje når den gamle flankeforkastningen forlater området med aktive magmakamre i jordskorpen, og denne konsolideres og hever seg isostatisk. Relieffet på forkastningsskrentene er da i størrelsesorden 1200-2000 meter (Fig. 4.7). De gamle forkastningsblokkene med sine forkastningsskrenter og deler

av paleo-aksedalene blir da en del i rekken av halvgrabener som danner den inaktive havbunnskorpen og med tiden beveger seg vekk fra den aktive aksedalen (Fig. 4.7). De fossile sulfidforekomstene følger med i disse skrentene og paleo-kompleksene, og kan utgjøre store mineralressurser. Men flere faktorer begrenser tilgjengeligheten av disse fossile forekomstene.

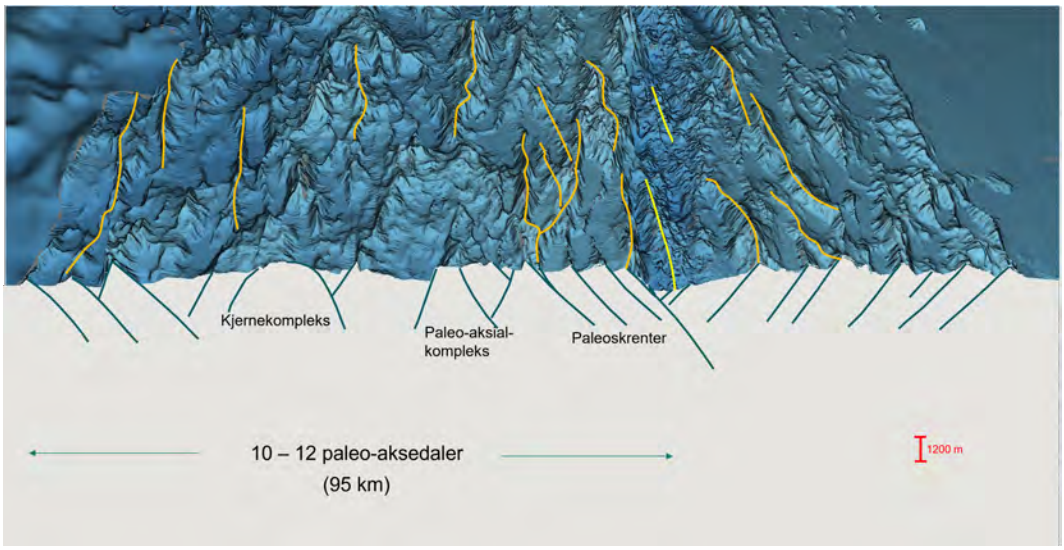

Fig. 4.7 Mohnsryggens flankevidder
Perspektivkart over Mohnsryggen sett fra sør. Kartet er en kombinasjon av havbunnstopografien og et snitt av jordskorpen på tvers av aksedalen. Kartet viser at havbunnens berggrunn med sine fjelltopper, rygger, daler og gamle forkastningsskrenter i sin tid ble dannet av de tektoniske og vulkanske prosessene i aksedalen og deretter transportert utover i flankene av spredningsprosessen.

Dalbunnen i aksedalen er vulkansk aktiv og blir kontinuerlig tilført lava fra vulkanske utbrudd spredt rundt om i dalen. Selv om de enkelte utbrudd er spredt, vil de over tid ha dekket hele dalbunnen. Kartlegging og datering utført av UiB viser hvor dynamisk utviklingen av dagens dalbunn er. Undersøkelsene viser at 70 pst. av overflaten ved aksiale vulkanrygger er blitt vulkansk fornyet i løpet av de siste 25 000 årene. For de dype områdene som omgir de aksiale vulkanryggene, og overføringssonene som binder dem sammen i et spredningssystem, er omkring 40 pst. av havbunnen blitt vulkansk fornyet i løpet av de siste 25 000 årene. For aksedalen som helhet er bildet at: 1) omkring 75 pst. av arealet er blitt vulkansk fornyet i løpet av de siste 50 000 årene, 2) mindre enn 10 pst. er eldre enn 100 000 år, 3) det er ikke påvist områder der de øverste lavastrømmene er eldre enn 180 000 år (Stubseid et al., 2023). Dette betyr at store deler av overflaten av dalbunnen blir fornyet med lava i løpet av 25 000-50 000 år, og dermed må man ta i betraktning at en del av fossile aksialforekomster vil være dekket av lava før de eventuelt inkorporeres i et paleo-kompleks og blir transportert ut av aksedalen. På land klarer man å utvinne forekomstene selv med slik lagdeling. For havbunnsmineraler er det stor sannsynlighet for at fossile sulfidforekomster som er dekket av lava vil være utilgjengelige med dagens teknologi. Aksialforekomster uten lavadekke derimot, må regnes å ha et stort bevaringspotensial og vil være lett tilgjengelig dersom de er lokalisert nær kanten av forkastningsblokkene.

Flankeforekomstene utvikler seg stort sett i selve forkastningsskrentene eller i overgangen mellom skrent og dalbunn og dermed helt i ytterkantene av aksedalen. De har dermed mye mindre sannsynlighet enn aksialforekomstene for å bli dekket av ny lava. Disse forekomstene kan da utvikle seg over langt lengre perioder og bli betydelig større før vertsforkastningen blir inaktiv. Imidlertid er det en rekke forhold som kan føre

til at en god del av disse forekomstene vil kunne bli begravet så mye at de blir utilgjengelige med dagens teknologi. En forekomst som utvikles på hengblokken, nær en forkastning, kan ha minst fire utviklingsforløp: 1) den kan bli begravd av neste lavastrøm, 2) den kan bli begravd av ras, 3) den kan bli inkorporert i liggblokken som del av en rytterblokk, eller 4) den kan forbli på liggblokken og bli løftet ut av riftdalen når den neste hovedforkastingen dannes. Bevaringspotensialet for en forekomst som utvikles på liggblokken vil avhenge av hvor høyt i forkastningsskrenten den ligger. Topografien til havbunnen utenfor aksedalen består stort sett av en serie med halvgrabener adskilt av gamle forkastningsskrenter (Fig. 4.7). Sedimentene akkumuleres nede i halvgranbenene med skrentene stikkende opp i bakkant (Fig. 4.5). Dette betyr at jo høyere opp i forkastningsskrenten en fossil forekomst befinner seg, jo større sannsynlighet er det for at den vil være tilgjengelig for utnyttelse.

Store mengder sedimenter har kommet inn i Mohnsryggområdet fra den grunne Barentshavssokkelen i nord, særlig under istidene i kvartær. Ved endringen i spredningshastighet ved anomali 13 begynte Knipovitsjryggen (inklusive Grønlandsryggen) å utvikle seg og dannet en barriere mot sedimenttilførselen fra nord og inn i områdene vest for Mohnsryggen (Fig. 4.8). Men selv med denne barrieren er dagens sedimentasjonsrate på ca. 3 cm per 1000 år. Med denne raten vil sedimentdekket på vestsiden av Mohnsryggens aksedal være 0 meter på dagens flanke av dalen og øke gradvis vestover til ca. 900 meter ute ved trinnet i oseanskorpen (anomaliene 13 - 18), som ligger ca. 250 km vest for aksedalen (Fig. 4.8). Dette betyr at andelen tilgjengelige flankeforekomster avtar med avstanden vekk fra aksedalen. Foreløpig kartlegging viser at sedimenttykkelsene i halvgrabenene ved anomali 13 er 800-900 meter. Det betyr generelt sett at mindre enn den øverste halvparten av paleoskrentene stikker opp over sedimentdekket i dette området (gitt at skrentene opprinnelig er 1200-2000 meter høye). Overordnet sett anslås det derfor at 40 - 50 pst. av de potensielle forekomstene i arealet ut til anomali 13 vil være tilgjengelig med dagens teknologi. På østsiden av Mohnsryggen er det ingen barriere mot sedimenttilførselen fra nord, og 50-100 km mot øst er den vulkanske havbunnstopografien fullstendig begravet. De prospektive områdene i øst er dermed begrenset til dette 50-100 km brede beltet.

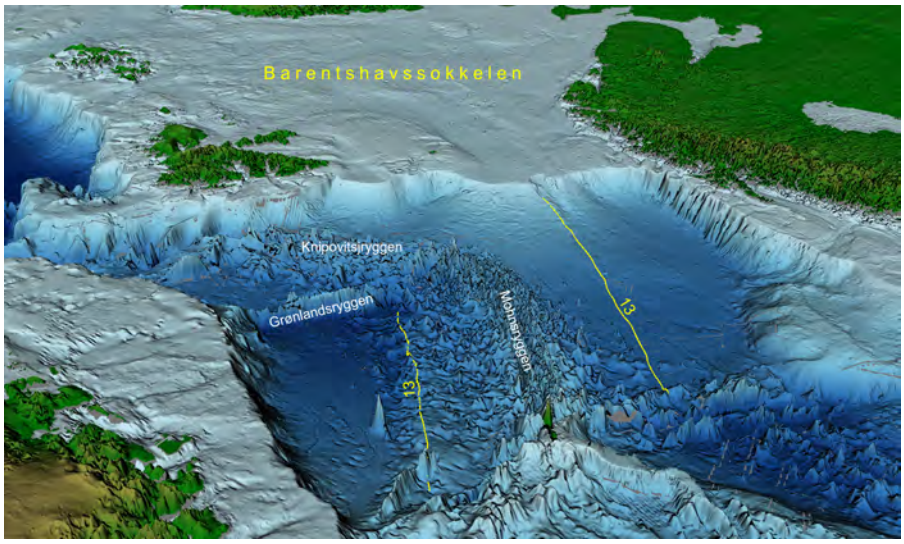

Fig. 4.8 Sedimentfordeling på havbunnen
Perspektivkart over havbunnen nord for Jan Mayen sett fra sør. Det viser hvordan endringen i spredningshastighet ved anomali 13 (vist i gult) førte til økt havbunnstopografi, og hvordan utviklingen av Knipovitsjryggen og Grønlandsryggen, sammen med Mohnsryggen, effektivt har skjermet områdene vest for Mohnsryggen fra den massive sedimenttilførselen fra nord.

Områdene sørvest for Knipovitsjryggen ut til grensen for kontinentskorpe (ca 80 km fra ryggen) vil også inneholde fossile sulfidforekomster (Fig. 4.9). Men her er sedimenttilførselen betydelig høyere enn i områdene vest for Mohnsryggen. Områdene langs nordøstsiden av Knipovitsjryggens aksedal er fullstendig begravet av sedimenter fra Barentshavssokkelen. Aksedalen skjermer delvis områdene på sørvestsiden, slik at man her finner en vulkansk topografi som langs Mohnsryggen. Men batymetri- og SBP-data viser at dette landskapet er dekket av vesentlig mer sediment enn langs Mohnsryggens vestside.

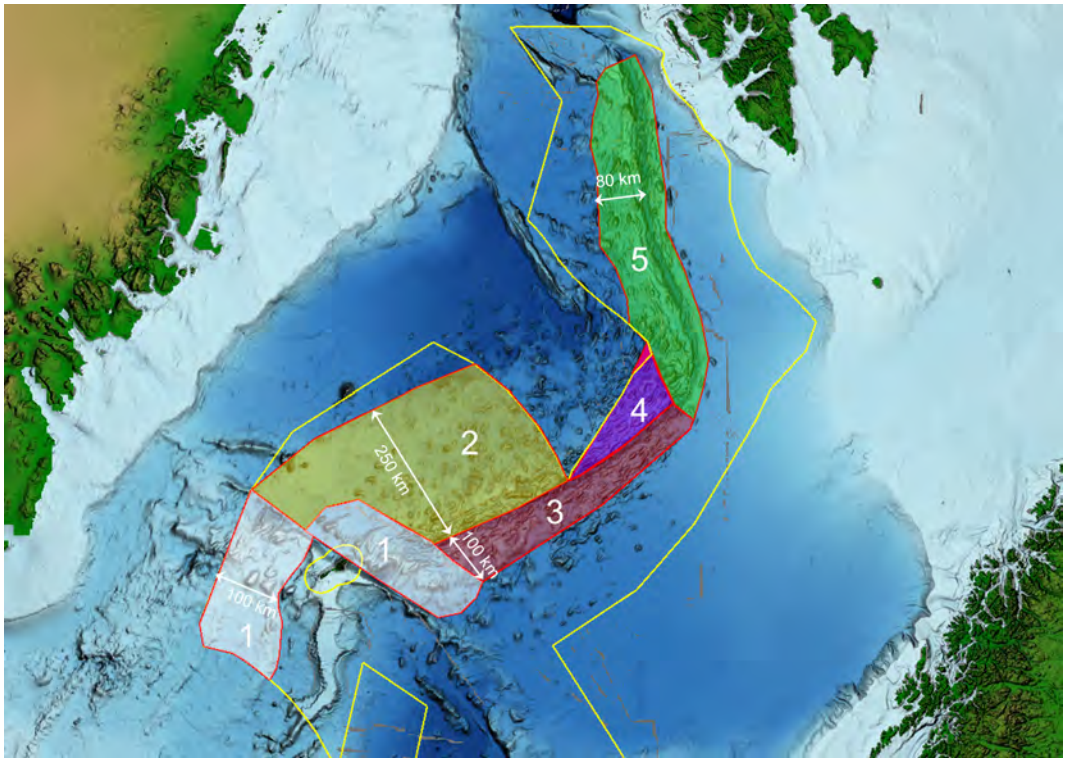

Fig. 4.9 Prospektive arealer for modellering av sulfidforekomster
Batymetrisk kart som viser havbunnsområdene på norsk sokkel der sulfidforekomster kan være tilgjengelig for leting og utnyttelse med dagens teknologi. Disse områdene er delt opp i delareal nummerert fra 1 til 5 til bruk for estimering av sulfidressursene (se 4.1.5.3 Antall forekomster). Den gule linjen viser grensen for utredningsområdet. Det røde polygonet viser en mulig overlapp med Grønlands kontinentalsokkel.

4.1.3 Geokjemi og metallgehalt

Den geokjemiske sammensetningen av sulfidforekomstene avhenger av mineralogien i vertsbergartene og temperaturen på den gjennomstrømmende hydrotermale væsken.

Undergrunnen inne i aksedalen består stort sett av basalter. Langs flankene kan vertsbergartene variere mer ved at de store flankeforkastningene kan bringe de dypere, ultramafiske bergartene opp i det hydrotermale systemet. Det generelle bildet fra litteraturen er at basalter gir høyere innhold av jern (Fe) og lavere innhold av kobber (Cu) og sink (Zn) enn ultramafiske bergarter, særlig der serpentin er involvert (Hannington et al., 2010; Cherkashov et al., 2010; Firstove et al., 2016). Forholdet mellom disse tre elementene avhenger også av temperaturen på væsken. Zn og Fe felles ut ved lavere temperaturer enn Cu. Det ser ut til at anrikning av kobolt (Co) er avhengig av at det finnes ultramafiske vertsbergarter. I publisert litteratur viser noen til at gull (Au) har sammenheng med ultramafiske bergarter, mens andre mener at Au-anrikning også har med temperaturen å gjøre (lav fallende temperatur gir mer Au).

Innblanding av sedimenter i prosessene vil også kunne påvirke geokjemi og metallgehalt. Hydrotermale reaksjoner som involverer sedimenter, resulterer i væsker med høyere pH og mindre evne til metalltransport. Dette fører til relativt metallfattige mineralavsetninger. Dette ser ut til å gjøre seg gjeldende i de nordlige deler av Mohnsryggens aksedal som er i kontakt med Bjørnøyvifta (se Fig. 4.25). Lokeslottet og Ægirforekomsten er således sterkt påvirket av sedimenter (Pedersen et al., 2010b; Baumberger et al., 2016), mens flankeavsetninger som Fåvne og Mohnsskatten er i liten grad preget av dette.

Vanndypet ser ut til å være en annen lokal faktor som kan påvirke geokjemien. Dette kan skyldes at det omgivende trykket kontrollerer kokepunkt og dermed temperaturen på den hydrotermale væsken der den når havbunnen. Grunne områder (grunnere enn 1500 meter) vil typisk være rike på Zn og fattige på Cu (Monecke et al., 2014).

Det ser ut til at man kan konkludere med at flankeforekomster gjennomgående har høyere innhold av Cu og Zn enn aksialforekomster. I tillegg må man ta hensyn til lokale forhold som sedimenttilførsel og generelt vanndyp. En del flankeforekomster inneholder interessante mengder Co. Det er derfor opprettet en egen Co-underklasse for flankeforekomstene. Innholdet av sølv (Ag) ser ikke ut til være systematisk forskjellig mellom de to typene forekomster. Innholdet av Au er varierende, og man bør legge inn muligheten for noe høyere Au-innhold i Co-underklassen.

Valg av gehalter er mer detaljert diskutert under avsnittet om letemodellparametere.

4.1.4 Geologisk ressursmodell

Den aktive sulfidforekomsten TAG på Den midt-atlantiske rygg sør for Azorene er valgt som grunnmodell for den tredimensjonale formen av en typisk hydrotermal sulfidforekomst, inkludert den interne fordelingen av mineralressursene. Valget er gjort fordi dette er en av de best studerte hydrotermale sulfidforekomster i verden. TAG ligger i hengblokken i dalbunnen helt inn mot flankeforkastningen langs østsiden av aksedalen, på den Midt-atlantiske spredningsryggen mellom Azorene og ekvator. I dette området former liggblokken en utstikker under hengblokken der TAG befinner seg, noe som kan påvirke porøsitet og temperatur i liggblokken (Canales et al., 2007). De vesentligste aspekter for vår bruk når det gjelder forekomstens geometri, mineralogi og mineralfordeling, er publisert av Hannington et al. (1998) basert på deres resultater fra ODP-tokt 158[1], og av Humphris et al. (2015).

En meget nyttig og mye brukt figur framstiller et snitt av undergrunnen i den grunnleggende TAG-modellen (Fig. 4.10). Den viser at forekomsten har form som et kremmerhus med en indre stratigrafi av forskjellige nivåer og soner av mineralinnhold, tekstur og hydrotermal omvandling av avsetninger og sidebergarter. Dette er basert på resultatene fra ODP-boringene på TAG-forekomsten (Fig. 4.11). Øverst i «kremmerhuset» ligger det et lokk av massive sulfidmineraler (mest pyritt) over en sone med massiv sulfidbreksje og anhydritt. Under dette er det utviklet en stockwerksone med breksjer av sulfidmineraler, anhydritt og amorf silika, som lenger ned går over i silifiserte og kloritiserte sidebergartsbreksjer. Stockwerksonen smalner nedover i dypet.

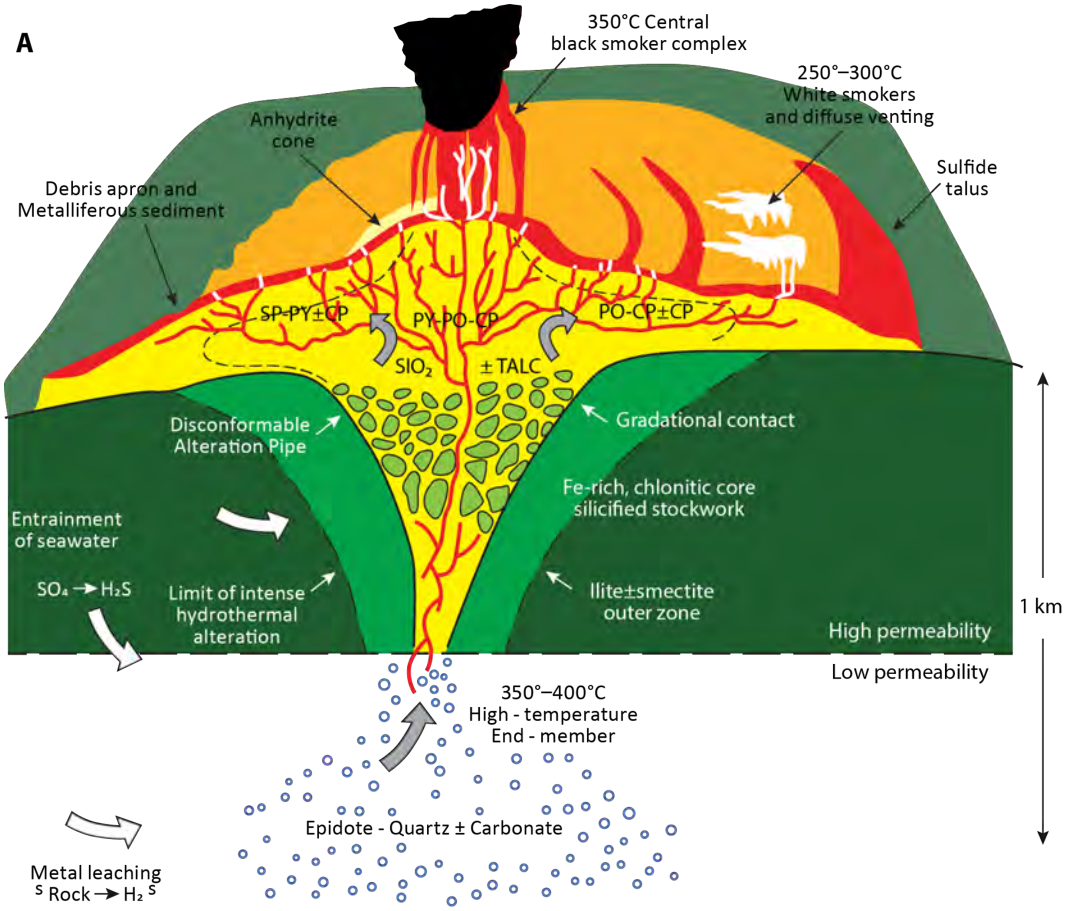

Fig. 4.10 Geologisk modell for sulfidforekomst
Generell geologisk modell for hydrotermale sulfidforekomster basert på TAG-forekomsten. Fra Piranjo (2009), etter Hannington et al. (1995).

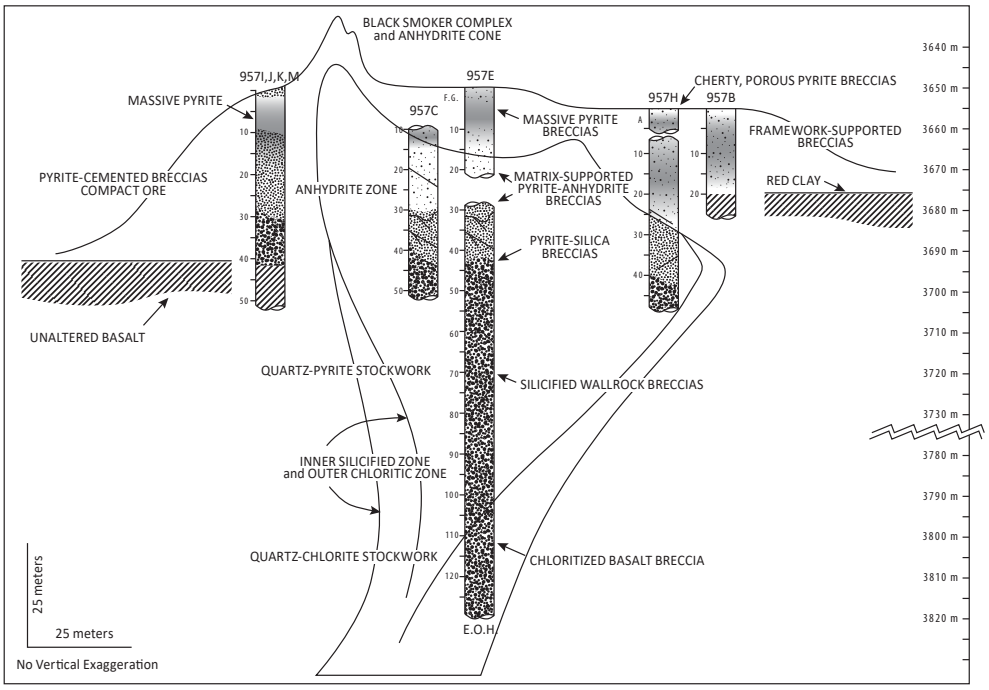

Fig. 4.11 TAG sulfidforekomst
Den geologiske strukturen for TAG-forekomsten tolket ut fra borekjernene fra Leg 158 av ODP-programmet (Hannington et al., 1998).

For estimering av mineralressursene er TAG-strukturen videre delt inn i ti soner alt etter mineralogi, metallgehalt, og hvor rene og massive litologiene er (eks. massiv sulfid, breksjert sulfid, breksjer med sidebergart). Ut fra boreresultatene har man anslått de forskjellige sonenes tre-dimensjonale form og størrelse (volum), beregnet massen av sulfid og metall i hver sone, og summert de totale ressursene (se Fig. 4.12 og Fig. 4.13). Denne modellbyggingen og ressursberegningen ville ikke vært mulig uten boreprøvene som viser utviklingen og avgrensingen av forekomsten i dypet.

Block #	Dimensions	Rock type	Density	Pyrite (vol%)	Volume (m³)	Σ Tonnes (t)	Pyrite (t)
1	40 X 35	Massive pyrite	4	80	87,970	351,860	281,500
2	60 X 15	Semi-massive pyrite	4	60	226,200	904,780	542,870
3	70 X 10	Massive pyrite	4	80	38,480	153,940	123,150
4	45 X 25	Massive pyrite	4	80	238,570	954,260	763,410
5	20 X 30	Anhydrite zone	3	<50	9,420	28,270	14,140
6	80 X 20	Anhydrite zone	3	<50	100,530	301,590	150,800
7	90 X 15	Pyrite-silica	3.75	50	95,430	357,850	178,930
8	85 X 15	Silicified wallrock	3.75	40	85,120	319,190	127,680
9	80 X 20	Silicified wallrock	3.5	30	100,530	351,860	105,560
10	50 X 25	Quartz-chlorrite	3.5	20	49,090	161,990	32,400
					1,031,340	3,885,590	2,320,440

Fig. 4.12 TAG blokkmodell
Blokk-modell for TAG-forekomsten (Hannington et al., 1998)

Dimension	Blocks	Volume (m³)	Calculated tonnage (t)
Total size of deposit	Blocks 1–10	1,031,300	3,885,600
Exposed mound of massive sulfides*	Blocks 1–6	701,163	2,695,000
Subseafloor stockwork mineralization	Blocks 7–10	330,160	1,190,900
Total pyrite content	Blocks 1–10	—	2,320,440
Total Cu	1–2% Cu in blocks 1–10	—	30,000–60,000
Anhydrite zone	50% anhydrite in blocks 5,6	109,950	329,860

Note: * = to a depth of 20–25 m

Fig. 4.13 TAG tonnasjeberegning
Størrelsen på TAG-avsetningen inkludert den øvre, massive SMS-sonen og den underliggende stockwerk-sone.

Foreløpig har vi ikke nok data i den tredje dimensjonen (dypet) i de forekomstene vi har påvist på norsk sokkel, men vi har informasjon om form og areal i kartplanet (overflaten). Ved å kombinere størrelsesforholdene i 3D-modellen for TAG-strukturen med våre form- og arealkart, kan vi beregne hva som kan være realistiske volumer av malm i våre forekomster. I den grad vi har gode tall for metallgehalten i de enkelte forekomstene, får vi da realistiske, mulige ressurstall for disse. Dette brukes til å kalibrere våre letemodeller.

4.1.5 Letemodeller for sulfidforekomster

OD har definert to hovedletemodeller for hydrotermale sulfidforekomster ut fra forekomstenes tektoniske posisjon i spredningsryggens aksedal: Aksialmodellen og flankemodellen. Flankemodellen er delt i to underpopulasjoner: forekomster med mer enn 0,1 pst. Co og forekomster med lavere koboltinnhold. En tredje letemodell er opprettet for to områder med vesentlig grunnere vann: Langs Kolbeinseyryggen i sørvest og i et område med magmatisk oppbygninger rett nord for Jan Mayen ligger havbunnen på vesentlig grunnere dyp (2000 - 300 m) enn i de øvrige områdene. Dette kommer av at

disse områdene er sterkt påvirket av den store varmepunktsdiapiren i jordens mantel under Island. Metallinnholdet i disse områdene skiller seg distinkt fra de øvrige, dypere områdene når det gjelder sink (Zn) og kobber (Cu) (data fra UiB). Dette kan skyldes et lavere vanntrykk, og dermed lavere temperatur på den hydrotermale væsken som strømmer ut (Monecke et al., 2014). Disse områdene er derfor skilt ut i en egen letemodell kalt Gruntvannsmodellen (se også 4.1.5.4 Metallgehalter og 4.1.5.3 Antall forekomster).

For hver letemodell er det definert et sett med de nødvendige parametre som inngår i de statistiske beregningene, og deres tallverdier. Tallverdiene for disse parametrene oppgis med spredning; minimum, forventning og maksimum. I det følgende oppsummeres hvordan, og med hvilken begrunnelse, man har valgt parametre og fastsatt tallverdiene for våre beregninger.

Beregningen av mengden sulfid i hver letemodell er gitt ved:

(Antatt tonn sulfid pr forekomst) x (Antatt antall forekomster) = Tonn sulfid i letemodell

Alternativt kan man beregne antatt tonn malm pr forekomst ved å bruke volum og tetthet:

(Volum[1] sulfid pr forekomst) x (Tetthet sulfid pr forekomst) x (Antall forekomster) = Tonn sulfid i letemodell

[1]Volumer beregnes ved hjelp av areal og tykkelse (dyp) av forekomstene.

For forekomster på land finnes det mye informasjon om variasjonen og fordelingen av mengde per forekomst. For estimering av ressurser på land kan man benytte antatt mengde per forekomst direkte uten å gå veien om volum og tetthet. Denne landstatistikken vil være viktig å bruke som kalibrering for forekomster til havs, men foreløpig ikke som direkte analog.

For forekomster på havbunnen er den tilgjengelige informasjonen om overflatearealer av de enkelte forekomstene langt sikrere enn eventuelle tall for mengde. OD ha derfor valgt å beregne antatt mengde per forekomst ved hjelp av volum (beregnet ved areal og tykkelse (dyp)) og tetthet.

4.1.5.1 Volum

For å beregne volumer trenger man overflatearealet av forekomsten, utstrekningen av forekomsten i dypet («tykkelsen»/dypet) og en modell for hvordan areal og dyp henger sammen. Oljedirektoratet har valgt den publiserte TAG-modellen (se 4.1.4 Geologisk ressursmodell) som grunnlag for sin beregningsmodell for sulfidforekomster (Hannington et al., 1998). I beregningsmodellen deles forekomsten i to: øverst en sone kalt den massive sulfidkappen (inneholder lag av massive sulfidutfellinger, sementerte sulfidbreksjer og anhydritt), og under denne en stockwerksone (sulfidmineraliserte breksjer av sidebergart). Den massive sulfidkappen er dannet i overflaten og gir overflatearealet av forekomsten. I henhold til TAG-modellen er arealet i toppen av stockwerksonen ca. en fjerdedel av overflatearealet (sulfidkappen). Volumet av den massive sulfidkappen beregnes som et flak med en gjennomsnittstykkelse. Stockwerksonen har form som et kremmerhus som strekker seg nedover i dypet. I TAG er stockwerksonen ca. 80-100 meter dyp og utgjør ca en tredjedel av den totale

tonnasjen beregnet for TAG (se Hannington et al., 1998). Det vil si at forholdet mellom tonnasjen i stockwerksonen og tonnasjen i den massive sulfidkappen er ca. 0,45. I ressursmodellen brukes dette forholdstallet til å beregne ressursene i stockwerksonen som et tillegg til ressursene i den massive sulfidkappen.

Tall for overflatearealer av marine sulfidforekomster er tilgjengelig fra publikasjoner og ODs egen kartlegging. Hannington et al. (2010) presenterer en global oversikt over størrelser og gehalter fra kjente forekomster i dagens spredningsrygger i oseanene og øybuebassenger. Tallene som er oppgitt for forekomster fra spredningsryggene er benyttet i "kalibreringen" av våre valgte parameterverdier (se Tab. 7.3). Det aritmetriske gjennomsnitt av forekomster med areal større enn 1000 m^2 (30 stk.) fra midt-oseanryggene er ca. 35 000 m^2. Dette er valgt som middelverdien for forekomststørrelsen i ODs beregninger. Til sammenligning er dette større enn grunnarealene av Lokeslottet (26 000 m^2) og Fåvne (10 000 m^2), mens Mohnsskatten er ca. dobbelt så stor.

Den massive sulfidkappen i en forekomst består i overflaten av områder med skorsteiner og kjegleoppbygninger opp til 20-30 meters høyde. Men den gjennomsnittlige høyden av sulfidkappen må settes slik at den representerer den gjennomsnittlige tykkelsen av sulfidkappen utjevnet over hele arealet. Solwara-1-feltet, som består av et svært variert landskap av 10-20 meter høye skorsteinskjegler, ble i 2008 beregnet til å inneholde ca. 2,1 millioner tonn sulfider på et areal på ca 90 000 m^2 (Hannington et al., 2010). Dette tilsvarer en gjennomsnittstykkelse på 6 meter, gitt en tetthet på 3,5. En detaljert reserveberegning gjort seinere (Lipton et al., 2012) gir ca. samme resultat. En slik utjevning av terrenget kan sammenlignes med at man samler volumet fra en 18 meter høy kjegle i en 6 meter høy sylinder på samme areal. Ved en slik betraktning vil Lokeslottet, som består av to kjegler på drøyt 20 meter, få en gjennomsnittstykkelse på 6-7 meter. Mange av de publiserte forekomstene oppgis å ha en gjennomsnittstykkelse på den massive sulfidkappen på 4-10 meter (Cherkashov et al., 2010), og OD ha valgt å legge seg på dette nivået i sine beregninger. TAG-forekomsten er spesiell ved at den har en gjennomsnittstykkelse på 23 meter på et areal på 31 000 m^2. TAG er en ung forekomst på ca 20 000 år (Cherkashov et al., 2017). Den må derfor ha hatt en høy og jevn aktivitet for å kunne ha jevnet seg så godt ut under oppbygging.

På grunn av den magmatiske aktiviteten i aksedalen, vil en god del av aksialforekomstene generelt sett ikke bli eldre enn 25 000 - 50 000 år. Denne begrensingen gjelder ikke for flankeforekomstene, som dermed i enkelte tilfeller kan være aktive over flere titalls- til hundretusener år og dermed vokse til betydelig større maksimumsstørrelser. Dette må det tas høyde for i spredningen i størrelser.

Derfor benyttes følgende parametre (Tabell 4.1 og 4.2) for beregning av volumet i forekomstene basert på den massive sulfidkappen:

Tab. 4.1 Volumtall for modellering av sulfidforekomster - aksialforekomster

Overflateareal, massiv sulfidkappe (km^2)	**0,001 – 0,035 – 0,3**
Tykkelse, massiv sulfidkappe (m)	**1,5 – 6 – 15**
Stockwerksonen beregnes som tillegg med forholdstall	**0,4 - 0,45 - 0,5**

Tab. 4.2 Volumtall for modellering av sulfidforekomster - flankeforekomster

Overflateareal, massiv sulfidkappe (km^2)	**0,001 – 0,04 – 0,5**
Tykkelse, massiv sulfidkappe (m)	**1,5 – 6 – 15**
Stockwerksonen beregnes som tillegg med forholdstall	**0,4 - 0,45 - 0,5**

OD har benyttet denne beregningsmodellen på tre forekomster med data fra egen kartlegging og universitetene - Mohnsskatten, Fåvne og Lokeslottet. Resultatene stemmer godt med størrelser publisert for marine forekomster andre steder, som referert til ovenfor.

4.1.5.2 Tetthet

Tettheten av sulfidavsetningene varierer med innholdet av anhydritt og breksjert materiale. Tettheten av massiv sulfid er 4. Ved innblanding av anhydritt eller breksjer blir den lavere. I TAG er tettheten i anhydrittsonene satt til 3 og i stockwerksonen til 3,5 – 3,75. Imidlertid blir anhydritten oppløst og mobilisert etter at den hydrotermale aktiviteten opphører. Tettheten i denne sonen vil da øke og bli nær tettheten av massiv sulfid.

For modellene benyttes følgende tetthet:

Tab. 4.3 Tetthet for modellering av sulfidforekomster

Kappesonen	**3,75 – 3,9 – 4**
Stockwerksonen	**3,5 – 3,7 – 3,8**

4.1.5.3 Antall forekomster

Beregnet antall forekomster i letemodellene blir fastsatt ut fra en antatt frekvens av forekomster langs aksedalen i spredningsryggen og en ekstrapolering av denne til de fossile aksedalerestene som ligger i flankeviddene, begrenset av graden av overdekning av sedimenter (se 4.1.2 Utbredelsen av sulfidforekomster - prosessene utenfor aksedalen).

Ifølge vitenskapelig litteratur er det omtrent 100 km mellom hver aktiv hydrotermal-forekomst langs ultrasakte spredningsrygger (Hannington et al., 2010). Men det påpekes også at tallet med stor sannsynlighet ikke er representativt for den reelle frekvensen av alle sulfidforekomster, som antas å være til dels mye høyere. Særlig må en forvente at det finnes langt flere inaktive forekomster enn til nå oppdaget (Cherkashov et al., 2010).

Til nå er det påvist seks aktive forekomster langs den 600 km lange Mohnsryggen (fra Jan Mayen til Lokeslottet), altså én forekomst pr 100 km. Disse er fra sentralt i aksedalen og den nordvestre flanken. I tillegg er det funnet to inaktive forekomster (Gnitahei og Mohnsskatten), samt spor av en til (Kobberåsen). Dette gir ni oppdagede forekomster totalt langs Mohnsryggens aksedal, ca 1,5 pr 100 km. Til sammenligning har man i det russiske kontraktsområdet på den midt-atlantiske rygg nå rapportert til sammen 24 forekomster, hvorav ni aktive, over en avstand på 880 km, dvs. 2,7 forekomster per 100 km (Cherkashov et al., 2010; Sudarikov et al., 2021). Fra litteraturen ser det ut til at frekvensen av flankeforekomster kan være betydelig høyere enn for aksialforekomster

(Cherkashov et al. 2010; 2017). Den sørøstre flanken av Mohnsryggen er lite undersøkt og det forventes at det vil finnes et tilsvarende antall forekomster langs denne som langs nordvestflanken, altså opp mot en dobling av dagens registrerte (dvs. antallet aktive kan økes til 12). Dette støttes ved at det er registrert to anomalier i vannsøylen i de sørlige delene av aksedalen (Stensland et al., 2019).

I det russiske kontraktsområdet har man datert en rekke av forekomstene (Cherkashov et al., 2017). Det viser at de fleste forekomstene har vært aktive i flere perioder. Forekomstene der deles inn i tre aldersklasser etter sin eldste registrerte, aktive periode (maksimumsalder): unge, 0-25 000 år, middelaldrende, 25 000-90 000 år, og gamle, over 100 000 år. Forekomsten Petersburgskoye har den høyeste maksimumsalder med ca. 225 000 år. Levetiden for nye forekomster kan da antas å ligge omtrent midt mellom de unge og middelaldrene forekomstene her. På Mohnsryggen kan dette representeres av Lokeslottet med sine på 20 000 år. Å anta 12 slike forekomster til enhver tid langs Mohnsryggens aksedal, vil teoretisk sett innebære dannelsen av 600 forekomster i løpet av 1 million år.

Aksedalen er generelt 15-20 km bred innenfor kantene av flankeforkastningene. Flankeforkastningene er 1-2 km brede i kartplanet, og utgjør dermed 10-20 pst. av hele aksedalens bredde. Vi antar da at av de forekomstene som utvikles i løpet av 1 mill år, vil ca. 90 utvikles i flankesonene mens resten (510) utvikles i dalbunnen. I følge Stubseid et al. (2023) blir grovt sett halvparten av arealet av dalbunnen vulkansk fornyet i løpet av 25 000 år, og mer enn 90 pst. blir fornyet i løpet av 100 000 år. Det betyr at så godt som alle de ca 450 forekomster som ble dannet i dalbunnen før 100 000 år siden ikke lenger finnes i overflaten, men er begravet av lava. Av de som er yngre kan man anta at i størrelsesorden halvparten (25-30), fremdeles finnes i overflaten. I flankesonene, som er langt mindre magmatisk aktive enn dalbunnen, vil en langt større andel av forekomstene forbli i overflaten. Innen det russiske kontraktområdet er anslagsvis 80 pst. av de aktive forekomstene oppdaget utenfor dalbunnsområdene (Cherkashov et al. 2010; 2017).

Dette innebærer at det kan finnes ca. 115 forekomster innenfor aksedalen. Det totale arealet av aksedalen, med flanker, regnes som ca. 1 200 km^2 (20 km x 600 km). Basert på dette, får vi en antatt forventet tetthet (***F***) på 9,5 forekomster per 1 000 km^2 i områdene av dagens og fortidens aksedaler. Tallet er usikkert; dette er det tatt høyde for ved at det er satt en minimums- og maksimumstetthet til hhv. 4 og 12 forekomster per 1 000 km^2.

Man kan anta samme tetthet (med spredning) av forekomster i gjennomsnitt i de tidligere aksedalene som i dagens. Dette snittet er gjort gjeldene for de områder som er prospektive til hver side av av dagens aksedal for alle de tre spredningsryggene, Kolbeinseyryggen, Mohnsryggen og Knipovitsjryggen. I sør gjelder det områdene i Gruntvannsmodellen, dvs langs Kolbeinseyryggen og i de magmatisk oppbygningene nord for Jan Mayen (se 4.1.1 Dannelsen av sulfidforekomster - aktiviteten i aksedalen og 4.1.5.4 Metallgehalter). Langs Mohnsryggens nordvestside vil det gjelde fjellandskapet i Grønlandshavet nord for Jan Mayen-bruddsonen ut til trinnet i havbunnskorpen ved anomali 13 - 18. Vestenfor ligger havbunnen 300-400 meter dypere og er blitt overdekket av sedimenter. I Grønlandshavet omfatter norsk kontinentalsokkel områdene innenfor 200-milssonen rundt Jan Mayen og et mindre, smalere område langs nordre del av Mohnsryggen. I sørøst er fjellandskapet blottet kun i en relativt smal sone langs aksedalen, resten er dekket av Bjørnøyviftas sedimenter i Lofotbassenget. Langs Knipovitsjryggen brukes samme forekomst-tetthet som langs Mohnsryggen i en relativt

smal sone (80 km) langs ryggens vestside. Østsiden er dekket av sedimenter fra de submarine viftene langs kanten av Barentshavet (se også 4.1.2 Utbredelsen av sulfidforekomster - prosessene utenfor aksedalen).

Områdene beskrevet ovenfor er delt inn i fem med hvert sitt areal for beregning av det totale antallet forekomster innenfor arealet som er angitt som prospektivt for sulfider (Fig. 4.9 ,Tab. 4.4)

Tab. 4.4 Prospektive arealer, modellering av sulfidforekomster

1.	**Områder nord og vest for Jan Mayen-ryggen**	**53 200 km^2**
2.	**Grønlandshavet innenfor Jan Mayens fiskerisone**	**80 850 km^2**
3.	**Sone langs Mohnsryggens aksedal i Lofotbassenget**	**24 850 km^2**
4.	**Grønlandshavet vest for nordre del av Mohnsryggen**	**10 600 km^2**
5.	**Områdene langs Knipovitsjryggen**	**53 000 km^2**

På grunn av sedimentasjonen gjennom tid vil en del av forekomstene i tre av disse områdene (1, 2, 3 og 5) være overdekket av sedimenter og ikke tilgjengelige (se 4.1.2 Utbredelsen av sulfidforekomster - prosessene utenfor aksedalen). Antallet forekomster blir derfor nedkortet tilsvarende. Det gjøres også nedkorting i gruntvannsområdet nord og vest for Jan Mayen-ryggen (område 1) fordi området/havbunnstopografien ikke gjenspeiler systematisk de magnetiske anomaliene med klare paleo-flankeskrenter slik de gjør langs Mohnsryggen. Beregning av antall forekomster med spredning innenfor hvert delareal blir da som i Tab. 4.5.

Tab. 4.5 Antall forekomster i hvert delareal, modellering av sulfidforekomster

1.	**Antall = 53 200 x *F (= 4 - 9,5 - 12)***	**nedkortet med 40 %**	**128 - 303 - 383**
2.	**Antall = 80 850 x *F (= 4 - 9,5 - 12)***	**nedkortet med 60 %**	**129 - 307 - 388**
3.	**Antall = 24 850 x *F (= 4 - 9,5 - 12)***	**nedkortet med 60 %**	**40 - 94 - 119**
4.	**Antall = 10 600 x *F (= 4 - 9,5 - 12)***	**nedkortes ikke**	**42 - 101 - 127**
5.	**Antall = 53 000 x *F (= 4 - 9,5 - 12)***	**nedkortet med 60 %**	**85 - 201 - 254**
	Totalt antall forekomster		**424 - 1007 - 1272**

Tallene gjelder for alle letemodeller samlet. Antallet forekomster i Gruntvannsmodellen er gitt direkte fra beregningen av delområde 1. Det resterende antallet fordeles med 75 pst. på Flankemodellen og 25 pst. på Aksialmodellen. Dette fordi litteraturen sier at frekvensen av flankeforekomster er vesentlig høyere enn for aksialforekomstene. I tillegg er oppbevaringspotensialet for aksialforekomstene lavere enn for flankeforekomstene (se 4.1.2 Utbredelsen av sulfidforekomster - prosessene utenfor aksedalen). Videre fordeles antallet forekomster i Flankemodellen med 65 pst. på Cu-Zn-typen og 35 pst. på Co-typen. Det samlede antall forekomster fordeles derfor som i Tab. 4.6.

Tab. 4.6 Sum antall forekomster, modellering av sulfidforekomster

Gruntvannsmodellen, antatt antall forekomster	**128 - 303 - 383**
Aksialmodellen, antatt antall forekomster	**74 - 176 - 222**
Flankemodellen, Co-type, antatt antall forekomster	**78 - 185 - 233**
Flankemodellen, Cu-Zn-type, antatt antall forekomster	**144 - 343 - 433**

4.1.5.4 Metallgehalter

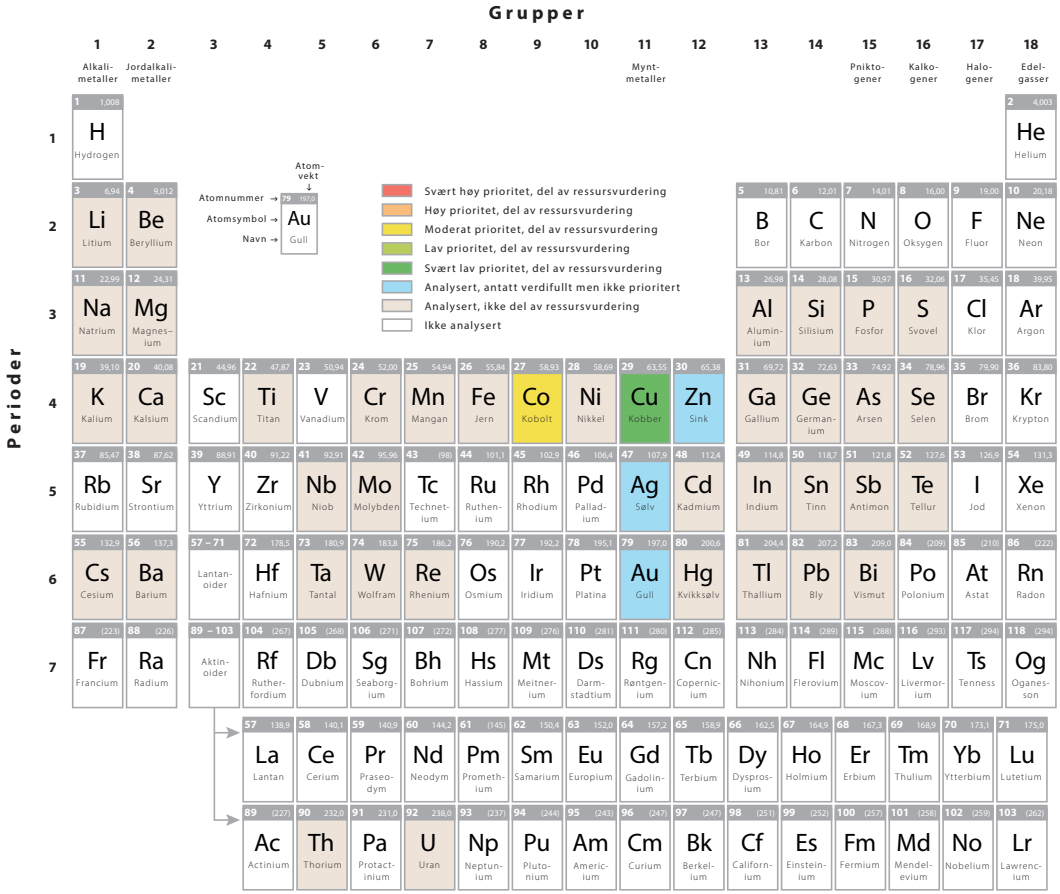

Fig. 4.14 Oversikt over grunnstoff analysert for i sulfidvurderingene

I tabellene Tab. 4.7, Tab. 4.8, Tab. 4.9 og Tab. 4.10 oppgis antatt metallgehalt for Cu, Zn, Co, Au og Ag. Det antas at aksialforekomstene vil generelt ha noe lavere innhold av Cu og Zn enn flankeforekomstene. Representative gehalter er vurdert ved å benytte tall publisert fra andre steder på Den midt-atlantiske rygg (se Hannington et al., 2010). Som gjennomsnitt for midt-oseanske rygger oppgir Hannington 5,9 pst. Cu og 6,1 pst. Zn. Samtidig påpeker forfatterne at dette er gjennomsnittet av analyser av prøver som er plukket fra overflaten av havbunnen. Slike prøver er plukket selektivt for andre formål enn å få et statistisk representativt utvalg, og kan slik sett gi en skjev fordeling. Mest sannsynlig har dette gitt en overestimering av gjennomsnittsgehaltene. Dette understøttes av at analyser fra borekjerner tatt under havbunnen stort sett gir vesentlig lavere gehalter, ofte en halvering (Hannington et al., 2010). I sine egne beregninger av

ressursene i TAG, har de samme forfatterne brukt 2,0 pst. Cu i SMS-sonen og 1,0 pst. Cu i stockwerksonen (Hannington et al., 1998; Hannington et al., 2010). Dette er basert på boreresultat foretatt på TAG under ODP 158.

Gjennomsnittsgehaltene for Cu og Zn i dagens spredningsrygger ligger stort sett høyere enn i de analoge VMS-avsetningene på land (vulkanogene massive sulfidforekomster). De landforekomstene som er de beste analogene til dyphavsforekomstene er de som har mafiske vertsbergarter og ligger i fjellkjedene. Franklin et al. (2005) oppgir et gjennomsnitt på 1,82 pst. Cu og 0,84 pst. Zn for slike avsetninger. Barrie og Hannington (1999) oppgir hhv 2,04 pst. Cu og 1,82 pst. Zn for mafiske forekomster. Årsaken til forskjellen i nivået på gjennomsnittet for Zn i publikasjonene er ukjent, men det kan komme av utvalget og antallet forekomstanalyser. Tallene fra Barrie og Hannington (1999) er videre underbygget av Galley et al. (2007). Gjennomgang av databasen over Fennoskandiske malmavsetninger i Kaledonidene (se Tab. 7.1, Tab. 7.2), viser gjennomsnitt på 1,68 pst. Cu og 2,77 pst. Zn for alle forekomstene (gjennomsnitt fra hhv. 112 og 95 forekomster). Men disse gjennomsnittene inkluderer også forekomster med sedimenter og alle typer vulkanitter som vertsbergarter, som hver for seg gir noe forskjellige gjennomsnitt. For utvalget av de med mafisk vertsbergart (grønnstein og amfibolitt), får man et gjennomsnitt på 1,80 pst. Cu og 2,39 pst. Zn (gjennomsnitt fra hhv. 32 og 24 forekomster) fra samme database. Dette er i samsvar med tallene til Barrie og Hannington (1999).

Forskjellen i de oppgitte gjennomsnittsgehaltene for forekomstene langs de oseanske spredningsryggene og landforekomstene, ser ut til å være reell selv om man tar hensyn til den mulige skjevheten i utvalget fra havbunnen. Dette gjelder særlig for havbunnsforekomster med ultramafiske vertsbergarter. For disse ligger de gjennomsnittlige gehalter for Cu og Zn ofte på 10-15 pst. (Cherkashov et al., 2010; Hannington et al., 2010). Dette er bl.a. rapportert fra den midt-atlantiske rygg sør for Azorene (Cherkashov et al., 2010), men til nå har man ikke påvist slike forekomster langs Mohnsryggen eller Knipovitsjryggen. Gjennomsnittsgehaltene for Cu og Zn for forekomster med mafiske vertsbergarter (basalt) fra Midt-Atlanteren viser en variasjon på 1,7-3,7 pst. for Cu og 0,4-2,4 pst. for Zn (Cherkashov et al., 2010). Til sammenligning er gjennomsnittet for analysene av Cu og Zn fra Mohnsskatten på hhv. 0,9 og 2,7 pst. (tall fra Oljedirektoratet), og fra Fåvne på hhv. 3,6 og 7,2 pst. (tall fra Oljedirektoratet, UiB, og Sahlström et al., 2022).

I de sedimentpåvirkede områdene aksialforekomstene er metallinnholdet generelt lavere. Lokeslottet inneholder et snitt på 0,96 pst. Cu, 1,52 pst. Zn, 0,4 ppm (parts per million) Au og 20 ppm Ag (tall fra UiB, Snook et al., 2018, Sahlström et al., 2022). I gruntvannsområdene er metallinholdet på nivå med flankeforekomstene, men forskjøvet mot Zn. Snittet for forekomstene Soria Moria, Perle & Bruse og Trollveggen er 0,36 pst. Cu, 8,25 pst. Zn, 0,92 ppm Au og 40,75 pst. Ag (alle data fra UiB). Dette er det tatt hensyn til i spredningen i tallene for Aksialmodellen og Gruntvannsmodellen.

Med unntak av de sedimentpåvirkede forekomstene, varierer Au og Ag moderat mellom forekomster med mafiske vertsbergarter på spredningsryggene, rundt 2 ppm Au og 70 ppm Ag. Dette ligger konsekvent markant høyere enn i analogene på land. En del dyphavsforekomster med ultramafiske vertsbergarter har vesentlig høyere gjennomsnitt for Au, opp til 40-50 ppm (se Cherkashov et al., 2010). Dette er det forsøkt tatt vare på ved å øke maksverdiene for gehaltene i den koboltførende letemodellen.

I vurderingen av gehaltverdier for våre beregninger er det lagt mest vekt på analyser av materiale kjernetatt under overflaten av havbunnen. Samtidig tar vi høyde for at gehaltene i dyphavet faktisk ligger høyere enn i de fossile analogene på land (se diskusjonen ovenfor). Tall for beregningene er gitt i tabellene Tab. 4.7, Tab. 4.9 og Tab. 4.10.

Tab. 4.7 Aksialmodell, metallgehalt

Cu (% wt)	0,5	1,2	4
Zn (% wt)	0,5	1,5	5
Au (ppm)	0,1	0,3	3
Ag (ppm)	1	17	100

Tab. 4.8 Gruntvannsmodell, metallgehalt

Cu (% wt)	0,2	0,5	5
Zn (% wt)	0,5	5	9
Au (ppm)	0,5	1	3
Ag (ppm)	0,5	40	150

Tab. 4.9 Flankemodell med Co, metallgehalt

Cu (% wt)	0,8	3	7
Zn (% wt)	0,5	3	7
Co (% wt)	0,03	0,33	0,6
Au (ppm)	1	2	5
Ag (ppm)	1	70	170

Tab. 4.10 Flankemodell uten Co, metallgehalt

Cu (% wt)	0,8	4	7
Zn (% wt)	0,5	3	5
Au (ppm)	1	2	3
Ag (ppm)	1	70	170

4.2 Sulfideksempel Mohnsskatten

For konkretisering av sulfidforekomster, er det gjort en mer detaljert modellering i form av et regneeksempel på Mohnsskatten. Mohnsskatten er sulfidforekomsten hvor OD har best datadekning. Mohnsskatten er lokalisert i skrenten på en av de store hovedforkastningene som utgjør nordvestflanken av aksedalen i nordlig del av Mohnsryggen (se Fig. 4.15).

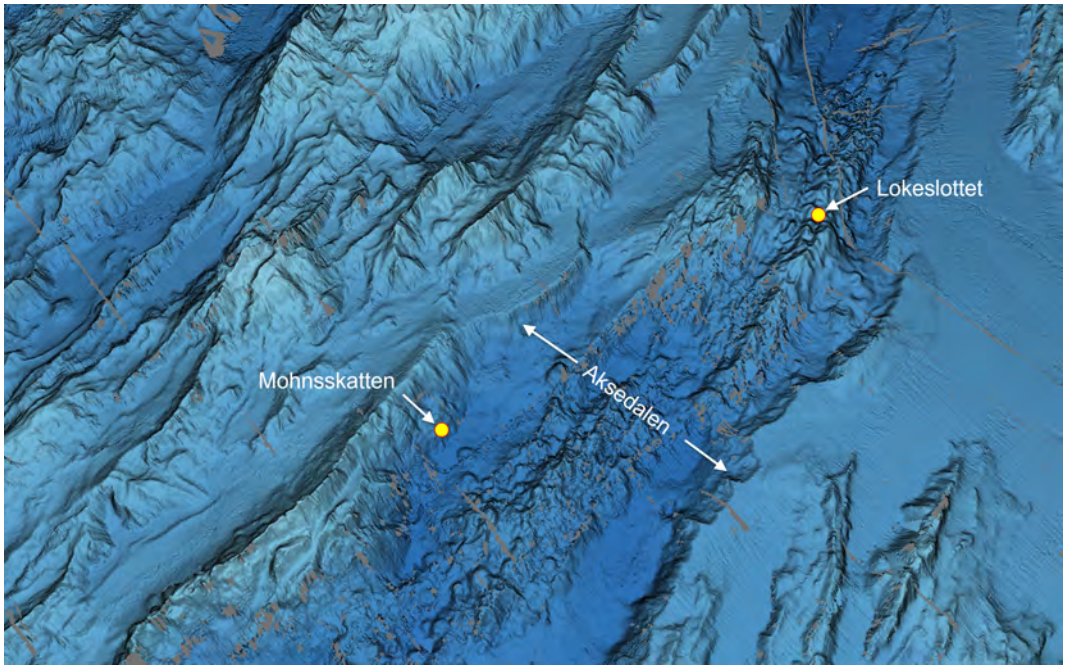

Fig. 4.15 Mohnsskattens (og Lokeslottets) beliggenhet
Perspektiv kart over nordlig del av Mohnsryggen sett fra sørøst. Det viser Lokeslottets tektoniske plassering på en vulkanrygg sentralt i aksedalen i nord, og Mohnsskatten på flanken lenger sør.

4.2.1 Geologi og tektonisk ramme

Spranget på hovedforkastningen ved Mohnsskatten er på ca 1200 meter, slik at dagens forkastningsskrent går fra eggen på ca 2000 meters dyp til foten langs dalbunnen på 3200 meter. Denne skrenten representerer overflaten av ligg-blokken av forkastningen og vil vokse videre så lenge forkastningen er aktiv og ligg-blokken hever seg. Forkastningen er fremdeles aktiv, og dagens spranghøyde har utviklet seg ved gjentatte episoder med større og mindre sprang gjennom forkastningens levetid. Disse forkastningsepisodene har påvirket og modifisert den store forkastningsskrenten.

Batymetrikartene viser at i området ved Mohnsskatten er hoved-forkastningsskrenten internt forkastet og glidd ut langs et 7-8 km langt og skålformet (listrisk) forkastningsplan (Fig. 4.16). Området innenfor denne forkastningsblokken ble da brutt opp i et system av mindre forkastninger. En sentral, sidelengs forkastning går i fallretningen og deler blokken i to deler med hvert sitt system av normalforkastninger i strøkretningen. I tillegg er området karakterisert av mer eller mindre skålformede skredgroper og tilhørende skredvifter. Skredviftene ligger langs dalbunnen ved foten av hovedforkastningsskrenten og langs foten av en større normalforkastning lenger opp i skrenten (Fig. 4.16).

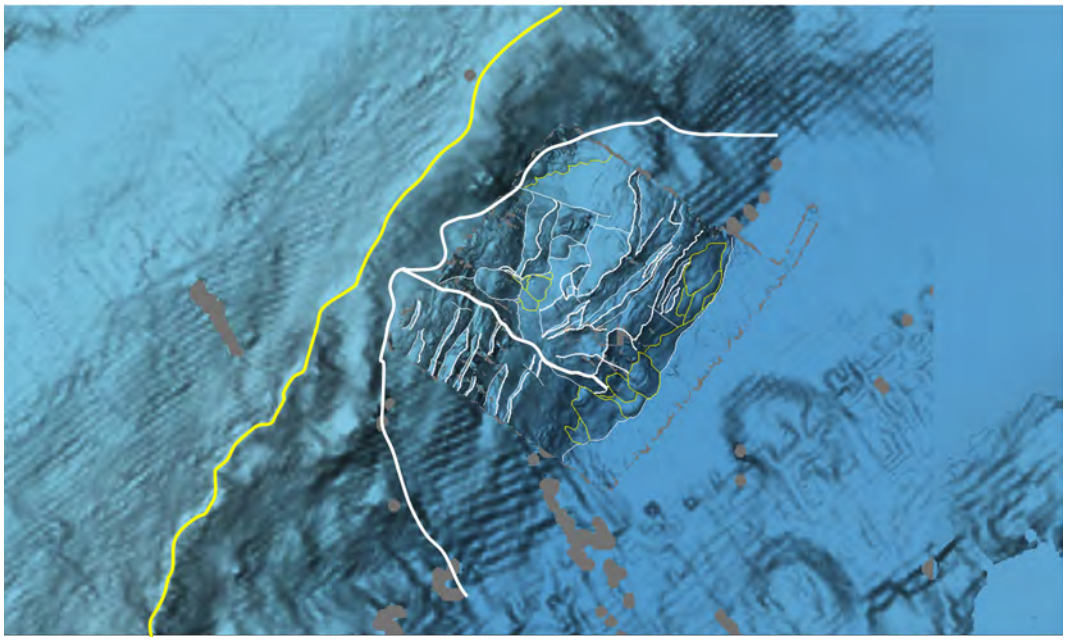

Fig. 4.16 Forkastningsskrenten ved Mohnsskatten
Kart over hovedforkastningsskrenten i området omkring Mohnsskatt-teigen. Eggen på skrenten er vist med tykk, gul linje. Bakkanten av den listriske forkastningsblokken og den sentrale sidelengsforkastningen som deler blokken i to er vist med tykk, hvit linje. De mindre, interne forkastningene i den listriske blokken er vist med tynn, hvit linje. Omrisset av de lokale skredviftene er vist med tynn, gul linje.

Mohnsskatten ligger på 2800-3000 meters vanndyp innenfor den nordlige forkastningsblokken i den nedre del av hovedskrenten, ca. 200 meter over den flate dalbunnen. Mohnsskatten er en sulfidteig bestående av inaktive skorsteiner, kjegler og hauger. En lokal, skålformet skredgrop er dannet i dette området, og sulfidteigen er utviklet på oversiden av og nedover skråningen i denne gropen (Fig. 4.17). Langs kanten på toppen av skråningen består sulfidteigen av en rekke med 18-20 meter høye, sammengrodde hauger og kjegler. Disse sammengrodde strukturene strekker seg videre nedover skråningen i skredgropen. Haugene langs kanten ser ut til å ha blitt kuttet av den opprinnelige skredflaten, men nye kjegler og hauger har vokst oppå og dekker nå denne flaten (Fig. 4.18). Dette betyr at skredgropen er dannet etter at den hydrotermale aktiviteten begynte, men en god tid før den sluttet. Det er mulig at den hydrotermale aktiviteten har svekket og destabilisert undergrunnen og dermed utløst skredet.

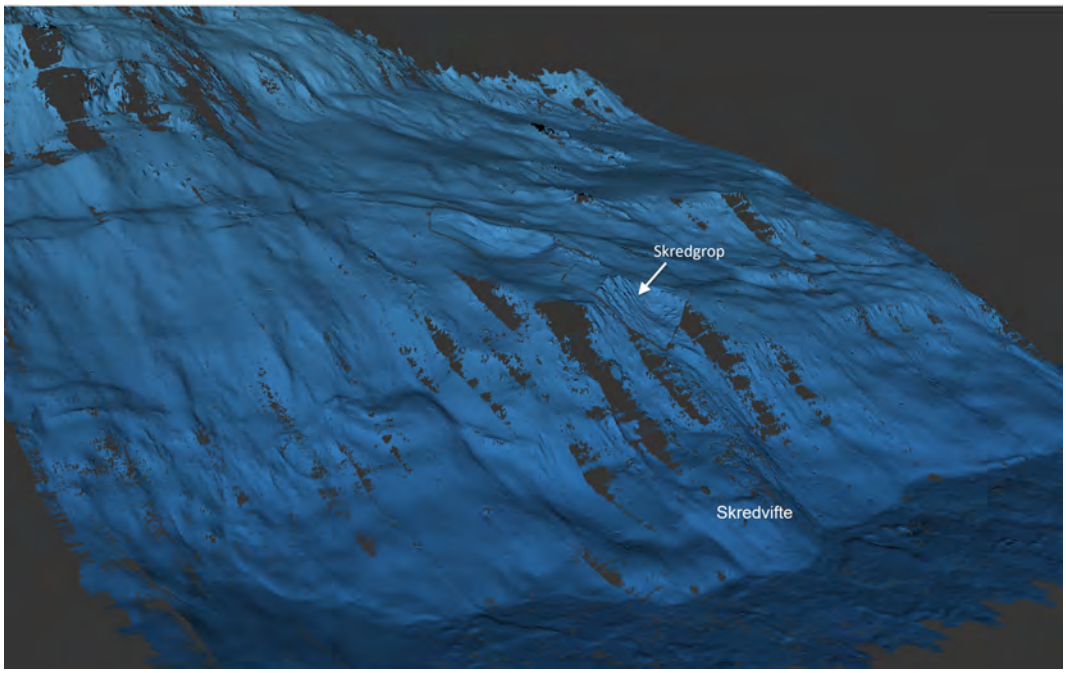

Fig. 4.17 Mohnsskattens beliggenhet i skrenten
Perspektivkart som viser beliggenheten av Mohnsskatten i flankeforkastningsskrenten. Her vises skredgropen sentralt i forekomsten og skredviften nedenfor.

Ovenfor haugene og kjeglene på skråningskanten fortsetter sulfidteigen som en 70 m bred og 150 m lang sulfidrygg av hauger og kjegler. Denne delen av teigen er skilt fra sulfidavsetningene på kanten av skredgropa av en 30 m bred sone uten synlige sulfidavsetninger (Fig. 4.18). Mohnsskatt-teigen består altså av to deler i overflaten (A og B). Selv om avstanden mellom er liten, har man vurdert to modeller for hvordan disse fortsetter ned i undergrunnen (se 4.2.2 Geokjemi og undergrunnsmodell).

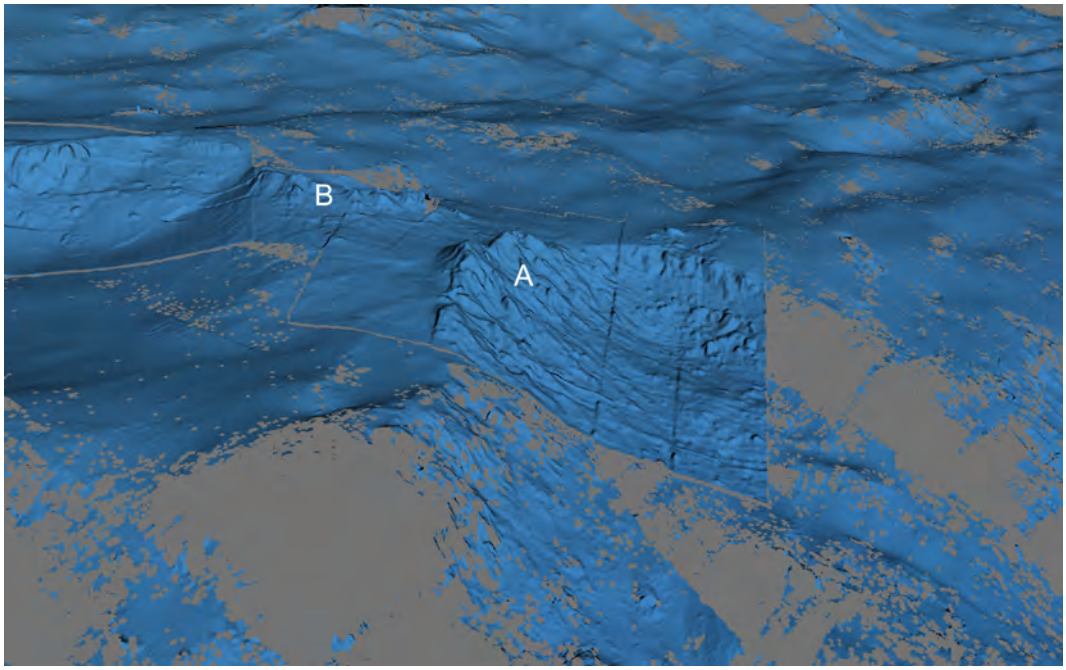

Fig. 4.18 Mohnsskatt-teigens A- og B-områder
Perspektivkart som viser skredgropen med sulfidhauger langs øvre kant. Litt vest for kanten på skredgropen ligger en mindre sulfidrygg omtalt i teksten.

Nedenfor den lokale skredgropen, ved foten av flankeforkastningen, ligger det en skredvifte som antagelig inneholder massene fra det lokale skredet (se Fig. 4.17). Da det antas at skredet gikk mens sulfidene ble avsatt, regner en med at denne viften også kan inneholde betydelige mengder med sulfid.

4.2.2 Geokjemi og undergrunnsmodell

OD har analysert 61 sulfidprøver tatt på Mohnsskatten i 2020. Analysene ble utført på AtLab i Canada (se excelark tilgjengelig på ODs hjemmeside). Ved å skille ut prøver med mer enn 1 pst. Cu og 1 pst. Zn, fikk man en klar indikasjon på at Mohnsskatten kan inndeles i Cu-rike og Zn-rike soner (Fig. 4.19). Det ble også tatt 75 prøver av sidebergartene. 38 av disse prøvene ser ut til å være hydrotermalt påvirket (mineralogi og struktur) og gir grunnlag for å indikere en hydrotermal sone som omslutter sulfidavsetningene (Fig. 4.19).

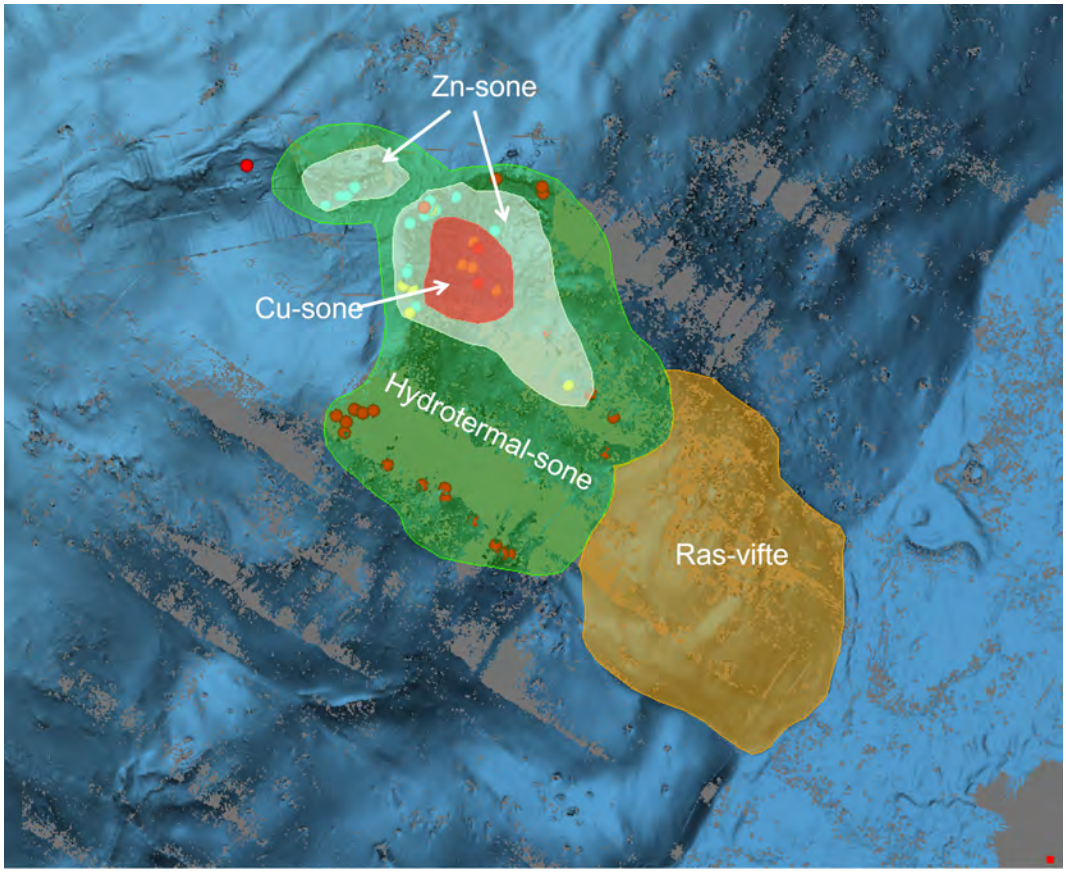

Fig. 4.19 Mohnsskatten med soneinndeling
Kart over Mohnsskatten sulfidvang. Den kopperrike sonen er vist med rødt, de sinkrike sonene vist med hvitt, den hydrotermalt påvirkede sonen i sidebergartene er vist med grønt, og skredviften som antas å inneholde sulfidressurser nedenfor er vist med oransje.

Denne soneinndelingen i kartplan er kombinert med den tredimensjonale TAG-modellen for å predikere to mulige, realistiske, tredimensjonale modeller for Mohnsskatten (se Fig. 4.20 og Fig. 4.21). I den ene, Modell 1, løper sulfidavsetningene i de to delene av Mohnsskatten sammen i undergrunnen, adskilt av 30 meter med hydrotermalt påvirkede sidebergart øverst mot overflaten (Fig. 4.20) I Modell 2 sitter de to delene over hvert sitt tilførselsrør (med stockwerksone) langs adskilte sprekkesoner ned i dypet til raksjonssonen (Fig. 4.21). Dimensjonene i modellene er tatt fra TAG-modellen kombinert med kartbildet i overflaten (Fig. 4.22).

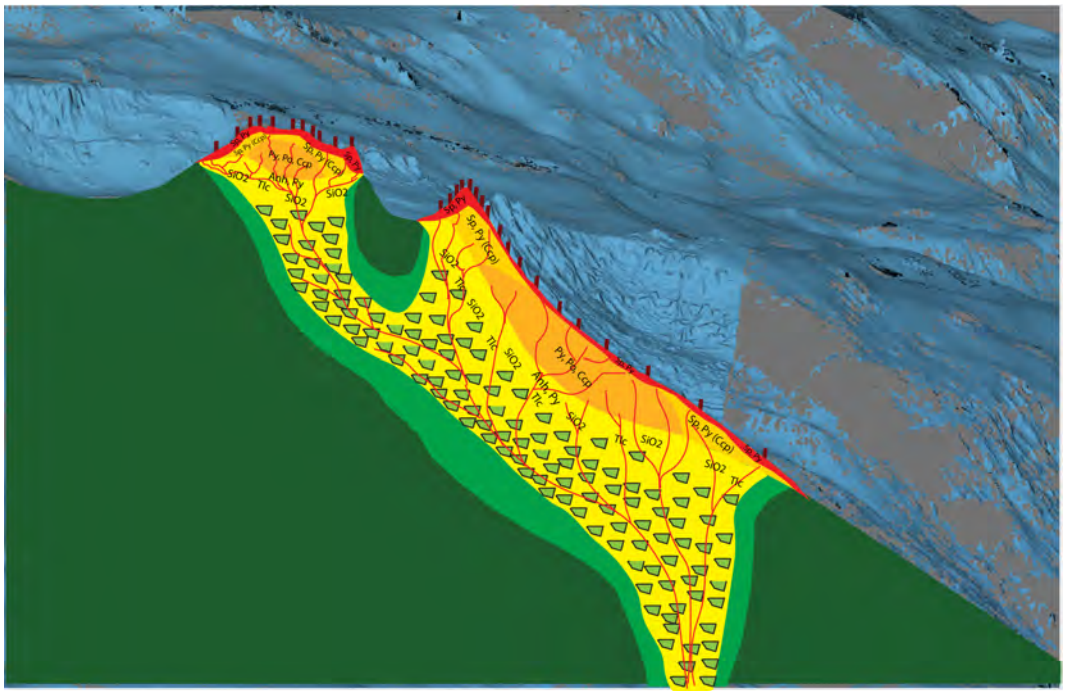

Fig. 4.20 Mohnsskatten Modell 1
Et snitt av jordskorpen på tvers av Mohnsskattens sulfidteig kombinert med havbunnstopografien sett i perspektiv fra sørøst. Et «topplokk» av massiv sulfid er antydet i rødt, de Cu-rike sonene er antydet i mørk oransje, de Zn-rike sonene er antydet i lys oransje, sonen med hydrotermalt påvirket sidebergart er antydet i lyst grønn, og sidebergarten er antydet i mørkt grønn. Stockwerksonen med mineralisering og bergartsbreksjer er antydet i gult med grønne fragmenter.

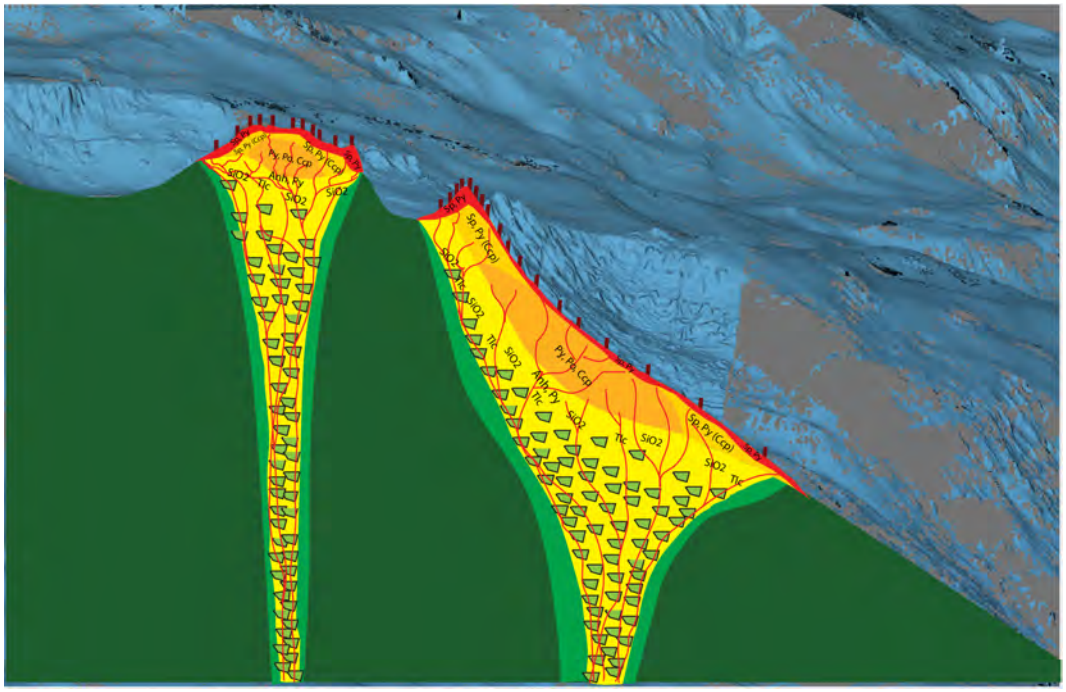

Fig. 4.21 Mohnsskatten Modell 2
Modell 2 for Mohnsskatten. Her har de to delene i overflaten adskilte tilførselsrør og stockwerksoner. Snittet og fargekodene er de samme som i Fig. 4.20.

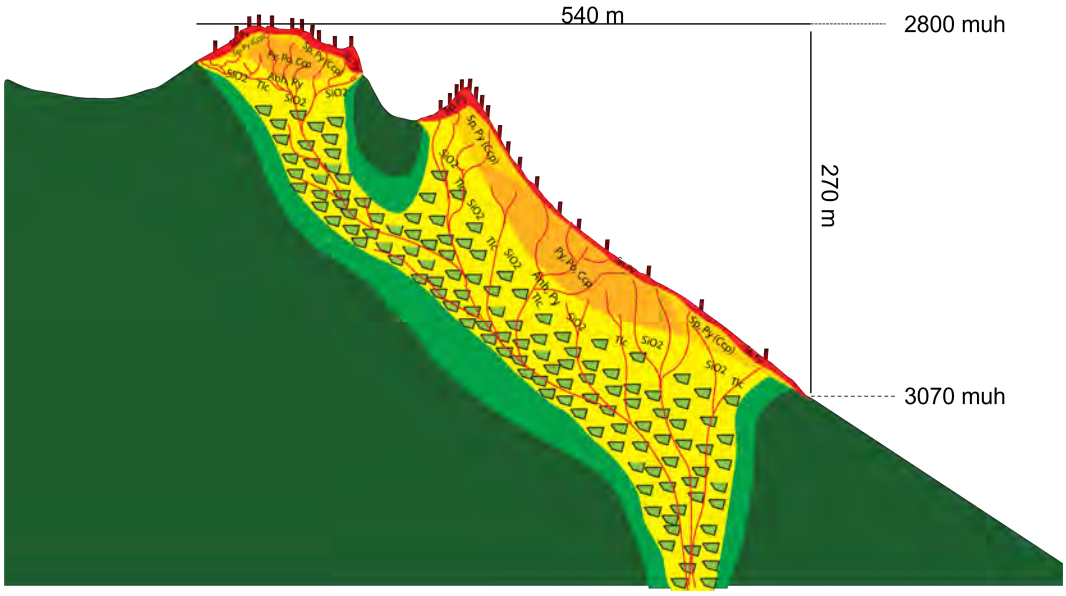

Fig. 4.22 Mohnsskattens dimensjoner
Snitt gjennom Modell 1 for Mohnsskatten som i Fig. 4.20 med målte dimensjoner i meter. Meter under havoverflaten er forkortet muh. De samme mål i overflaten gjelder også Modell 2 i Fig. 4.21.

4.3 Skorpeforekomster

4.3.1 Dannelse av fjellandskapet

Fjellandskap utvikles i varierende grad i flankeviddene langs midthavsryggene. Spredningshastighet og magmatisk aktivitet påvirker de mekaniske egenskapene til litosfæren som igjen kontroller den tektoniske utviklingen og landskapsdannelsen (Pedersen et al., 2021). Havområdene ved spredningsryggene på norsk sokkel ble formet ved hyppig rifting som til slutt førte til separasjon av Norge og Grønland for over 55 millioner år siden (Mosar et al., 2002). Siden den gang har nye fjellandskap blitt dannet langs spredningsryggene på norsk sokkel. Dette skjer ved at det magmatiske landskapet i aksedalen blir forkastet og løftet opp fra dalbunnen langs dalens flankeforkastninger, og ender opp som fjellrygger langs flankene av dalen når den aktive generasjonen av flankeforkastninger til slutt blir inaktiv og erstattes av den neste.

Med unntak av Jan Mayen-ryggen og områdene langs nordsiden av Grønlandsryggen, er havbunnsområdene av oseansk karakter. Bunntopografien i resten av Norske-/ Grønlandshavet styres av tre hovedelementer:

1. Et system av spredningsrygger (midthavsrygger) som strekker seg gjennom hele havområdet fra Island til Framstredet,
2. Bruddsoner som danner dallandskap og som går på tvers av spredningsryggene,
3. Dyphavsletter og sedimentære vifter med utspring ved kanten av kontinentalsokkelen (Pedersen et al., 2021).

De viktigste fjellandskapene i utredningsområdet er (se Fig. 4.23) :

- Østlige Jan Mayen bruddsone (55-25 millioner år gammel)
- Jan Mayen-ryggen (ca. 25 millioner år)
- Fjellområdene ved Mohnsryggen (ca. 40-0 millioner år)
- Fjellområdene ved Knipovitsjryggen (33(?)-0 millioner år)

Nærmere beskrivelse av hvordan havbunnen med disse fjellområdene er dannet er gitt i innledningen (4 Geologi og ressurser).

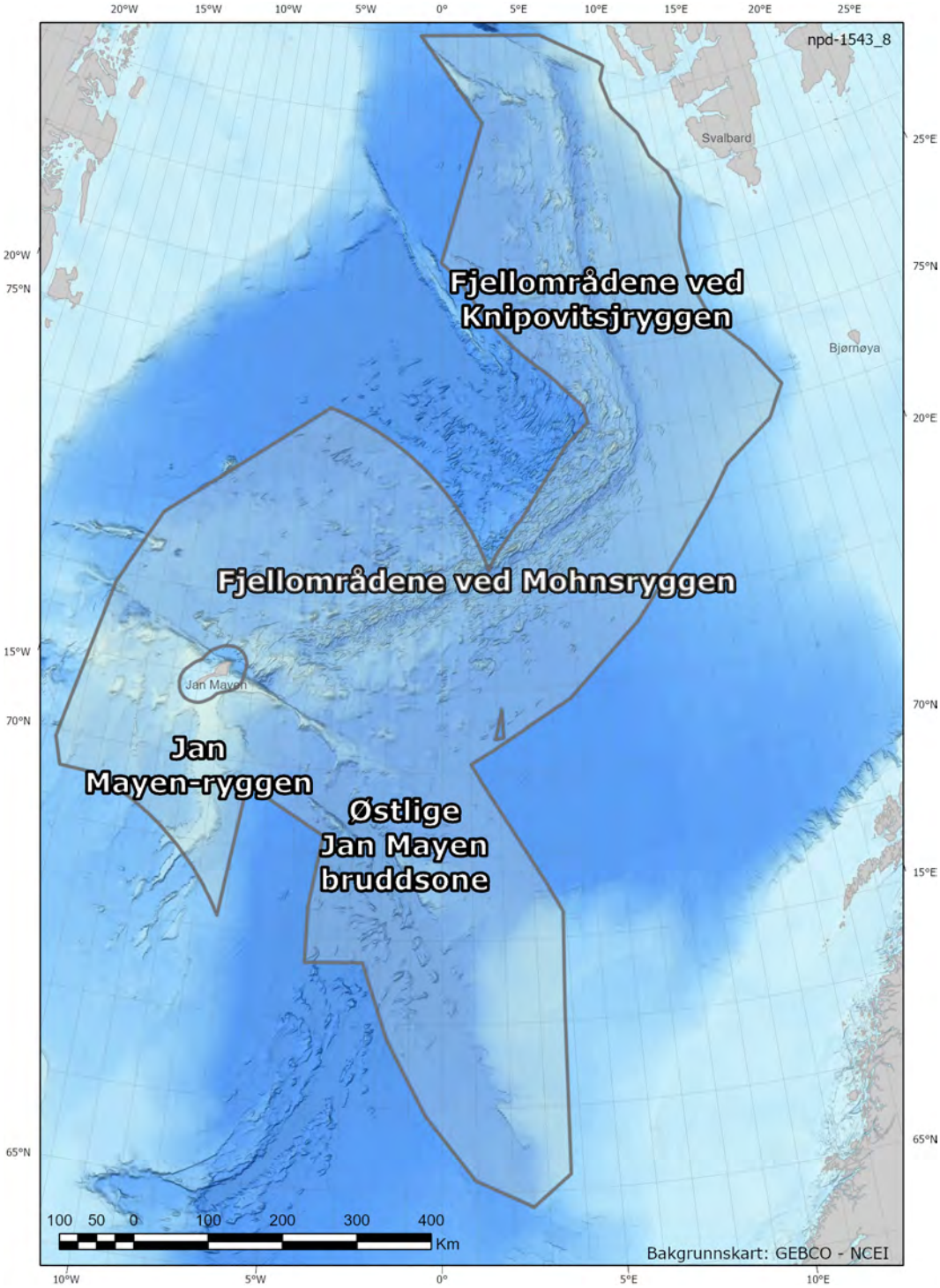

Fig. 4.23 Regionale fjellområder i Norskehavet og Grønlandshavet

Østlige Jan Mayen bruddsone (55-25 millioner år)

Spredningsryggene deles opp av bruddsoner som danner markerte landskapstrekk på tvers av ryggene. Bruddsonene består av den seismisk aktive delen av plategrensen der litosfæreplatene beveger seg sidelengs i forhold til hverandre og definerer en transformforkastning, og de seismisk inaktive, fossile delene av plategrensen i fortsettelsen av hver ende av transformforkastningen. Østlige Jan Mayen-bruddsone er en inaktiv, eldre del av bruddsone-systemet som strekker seg på tvers av Norske-/

Grønlandshavet. Bruddsonen er her definert av to parallelle daler som strekker seg 700 km fra Jan Mayen-ryggen til Møremarginen. Dalbunnen danner et slettelandskap med dybde på 3500-3700 m (Pedersen et al., 2021).

De to dalene, som representerer fossile transformforkastninger, er adskilt av en kjede av sjøfjell med fjelltopper som står 800-1400 m over slettelandskapet. Mot nordøst er slettelandskapet avgrenset av Vøringplatået, og videre vestover av Vøringutstikkeren og av fjellområder som skiller den østlige Jan Mayen-bruddsonen fra den aktive Jan Mayen-bruddsonen i vest. Avgrensningen mot Vøringplatået (kalt Vøring transform-margin) består av en 260 km lang fjellskråning, der det dype slettelandskapet går brått over i bratte skrenter og klipper som leder opp til Vøringplatået (Pedersen et al., 2021). Fjellutspringene består her av utgående sedimentære lag av kritt og paleocene alder (Polteau et al., 2020), og spektakulære magmatiske sill-intrusjoner (Styve, 2015; Bjerga et al., 2022). Ved Vøringutstikkeren avgrenses det dype slettelandskapet mot nordøst av en 120 km lang sammenhengende fjellside, der toppene rager 1000-1500 m over dalbunnen. Her er det også utgående lag av sedimenter og vulkanske bergarter (Pedersen et al., 2021).

Jan Mayen-ryggen (ca. 25 millioner år)

Jan Mayen-ryggen (JMR) var før spredningen mellom Grønland og den eurasiske platen en del av den grønlandske platen. Dannelsen av den nye spredningsryggen Reykjanesryggen, førte til at Jan Mayen-mikrokontinent med JMR begynte å løsne fra grønlandsplaten. For mellom 21 og 25 millioner år siden (anomali 6) ble Ægirryggen inaktiv og spredningen flyttet seg til Kolbenseyryggen vest for JMR, og JMR ble en del av den eurasiske platen (Gernigon et al., 2019).

Fjellområdene ved Mohnsryggen (ca. 40-0 millioner år)

Fjellområdene langs Mohnsryggen deles inn i Grønlandsbassenget nordvest og Lofotbassenget sørøst for Mohnsryggen. De høyeste fjelltoppene rager her 3000 meter over sletteområdene som omgir ryggen. Den gjennomsnittlige dybden av fjellandskapet er omkring 2000 meter i områdene nær aksedalen. Mot nordvest øker den gjennomsnittlige dybden og når 3400 meter der fjellandskapet går over i et slettelandskap, vest for magnetisk anomali 13 (Fig. 4.8).

Landskapstrekkene i fjellområdene er i stor grad definert av fossile forkastninger som var aktive da områdene ble dannet langs aksedalen. Pedersen et al. (2021) beskriver hvordan landskapet er bygget opp av fire hovedelementer:

1. Langstrakte forkastningsrygger,
2. Forkastningsbassenger som utvikles i halvgrabener mellom ryggene,
3. Kjernekomplekser som er blitt utviklet ved langvarig forkastingsaktivitet og som danner større fjellpartier,
4. Fjellmassiv som er blitt dannet ved et mer komplekst samspill av tektoniske og magmatiske prosesser.

Forkastningsryggene, som er det dominerende landskapstrekket, består av tre elementer: a) forkastningsskråninger som representerer forkastingsplan der dypere deler av skorpen og mantelen er/kan være eksponert; b) forkastingskanter, som definerer bruddkanten til forkastingene; c) skråstilt havbunn som består av vulkanitter som ble dannet i aksedalen og som siden er blitt løftet opp og skråstilt som følge av

forkastningsaktivitet. Områder med skråstilt havbunn har gradienter som vanligvis er mindre enn 10°. Forkastningsskråningene har derimot mange steder gradienter over 20° (Pedersen et al., 2021).

Fjellområdene ved Knipovitsjryggen (33(?)-0 millioner år)

Fjellandskapet langs Knipovitsjryggen er mindre markert enn langs Mohnsryggen. Langs hele ryggsegmentet har flankeviddene dybder mellom 2000 og 2500 meter. I to områder (76,4°N og 77,3°N) er det utviklet fjellområder i flankeviddene på begge sider av aksedalen. På vestsiden står disse 500-1500 meter over landskapet rundt. Disse sjøfjellene danner lineamenter som står skrått på aksedalen, men som er parallelle med spredningsretningen. I begge disse områdene er det i dag relativt høy vulkansk og tektonisk aktivitet i aksedalen. Her opptrer unge vulkanske ryggstrukturer som er flankert av normalforkastinger og lokale fjellformasjoner. Fjell-lineamentene indikerer at dagens vulkanske og tektoniske mønster har vedvart over mange millioner år (Hellevang og Pedersen, 2005). I Knipovitsjryggen er aksedalen svært skråstilt i forhold til spredningsretningen. Dette har i stor grad påvirket den magmatiske og tektoniske aktiviteten. Bortfall av et markert fjellandskap er trolig forårsaket av dette skråstilte spredningsmønsteret og av en svært lav effektiv spredningshastighet (Pedersen et al., 2021).

Det har også tidligere vært debattert om Hovgaardryggen og Grønlandsryggen består av oseansk havbunn eller er fragmenter av kontinentalskorpe. Flymagnetisk datainnsamling utført av Norges geologiske undersøkelse sommeren 2016 og 2018 viser lav til medium intensitet på de magmatiske anomaliene (Dumais et al., 2021). Dette er indikasjon på at det ikke er havbunnskorpe dannet ved havbunnsspredning (se 4 Geologi og ressurser og Fig. 4.3). Foreløpige tolkninger av prøver tatt av Hovgaardryggen og Grønlandsryggen på tokt i november 2022 (UiB/OD) tyder på at dette er sedimentære bergarter. Dette støtter teorien om at Hovgaardryggen ikke er et resultat av spredningsvulkanisme.

4.3.2 Dannelse og vekst av manganskorper

Manganskorper (Fig. 4.24) dannes ved utfelling av grunnstoffer fra havvannet. Utfelling av grunnstoff vil skje overalt i havet, men manganskorper dannes i hovedsak på bart fjell der det ikke er i konkurranse med sedimentasjon. Slikt bart fjell finner vi på undersjøiske rygger og fjellformasjoner i mesteparten av dyphavsområdene på norsk sokkel.

Fig. 4.24 Manganskorpe fra Vøringutstikkeren
Prøven ble hentet opp fra 2200 meters havdyp ved bruk av ROV i 2016.

Det er flere faktorer som kontrollerer og påvirker dannelse, vekst og bevaring av manganskorper. De viktigste er:

1. Alder på fjellandskapet
2. Stabiliteten og helning av fjellskråningene
3. Sedimenttilførsel og avstand til kontinenter,
4. Type og konsentrasjon av grunnstoff i havvannet,
5. Havstrømmer og lokale strømforhold.

Alder på fjellandskapet

Manganskorper vokser med noen få millimeter per millioner år. Skorpene i Norskehavet ser ut til å vokse med omkring en millimeter per hundre tusen år. Observasjoner gjort av UiB viser at tykkelsen på skorpene blir 20 cm eller mer i områder med 25-30 millioner år gammel havbunn, og tilsvarende at skorpene er 3-4 mm langs aksedalene der havbunnen er 0,5 millioner år gammel. Kunnskap om alderen på fjellandskapet har derfor stor betydning for å kunne forutsi tykkelsen av manganskorper i de forskjellige områdene (Pedersen et al., 2021).

Stabilitet og helning av fjellskråningene

For å få en viss tykkelse på manganskorpene må skråningene de ligger i vært stabile over lengre perioder. I tillegg må skråningene være steilere enn 20 grader slik at sedimenter sklir av og ikke blir akkumulert på bergflaten. Observasjoner fra 12 år med samarbeidstokt med UiB viser klare variasjoner i skråningsstabilitet innenfor utredningsområdet og at geologiske egenskaper kontrollerer om et sjøfjell/-rygg er prospektivt.

Sjøfjellene på hver side av Mohnsryggen og Knipovitsjryggen består i hovedsak av magmatiske bergarter som i sin tid ble dannet i aksedalen (4.3.1 Dannelse av

fjellandskapet). Videotransekter (undersøkelser med ROV med innsamling av video, samt prøvetaging) opp langs skråninger med ulik og varierende helningsgrad indikerer at disse sjøfjellene har relativt stabile skråninger. Dette betyr at man i stor grad kan bruke alderen på sjøfjellet og helningen på skråningen til å beskrive forventet tykkelse av manganskorper. (Se kapittel 4.5 Manganskorpe-eksempel sjøfjell nordvest i Grønlandshavet for eksempel).

Foreløpige vurderinger av prøver tatt på Hovgaardryggen vest for Knipovitsjryggen, viser derimot at bergartene under manganskorpene er konsoliderte sedimenter. Dette tyder på at grunnfjellet her kan være kontinentalt. Det ble også her utført videotransekter (undersøkelser med ROV) opp skråninger med varierende helningsgrad. Disse transektene viste mer ustabile skråninger med liten eller ingen vekst av manganskorper. Tykke manganskorper ble kun funnet i et par områder mot toppen av skråningene. Dette kan tyde på at svak skråningstabilitet og erosjon forhindrer vekst av manganskorper.

Undersøkelsene uført på Jan Mayen-ryggen, Vøringutstikkeren og Vøringplatået viser i likhet med Hovgaardryggen en stor variasjon i tilstedeværelsen av manganskorpe i fjellskråninger på over 20 grader. Dette indikerer at geologiske egenskaper har betydning for vekst av manganskorper.

Sedimenttilførsel og avstand til kontinenter

Tilførsel av sedimenter til dyphavet har stor innvirkning på dannelsen av manganskorper. Etter at spredningen mellom Norge og Grønland startet for over 50 millioner år siden har sedimenttilførsel fra kontinentalmarginen variert over tid. Også i dag ser vi stor forskjell i sedimenttilførsel innenfor utredningsområdet. Sedimentasjonshastigheten i områdene rundt Mohnsryggen er på 3-4 cm per tusen år (Flesland et al., in prep; Stubseid et al., 2023). I selve aksedalen er sedimentasjonshastigheten 6 cm per tusen år (Stubseid et al, 2023). Det vulkanske landskapet begraves derfor relativt hurtig av sedimenter.

Til sammenligning er sedimentasjonshastigheten ved den ekvatoriale delen av Den midtatlantiske ryggen 30 ganger lavere (0,1-10 mm; Agius et al., 2018).

På en aksial vulkanrygg i den sentrale delen av Knipovitsjryggen er sedimentasjonshastigheten målt til 7 cm per tusen år (Stubseid et al., 2023). Dette er over dobbelt så mye som ved tilsvarende vulkaner langs Mohnsryggen (Stubseid et al., 2023). Den raske sedimentasjonen skyldes at aksedalen i Knipovitsjryggen ligger nær inntil kontinentalskråningen og nær viftene som tilfører sedimenter ut fra Spitsbergen og Barentshavet ().

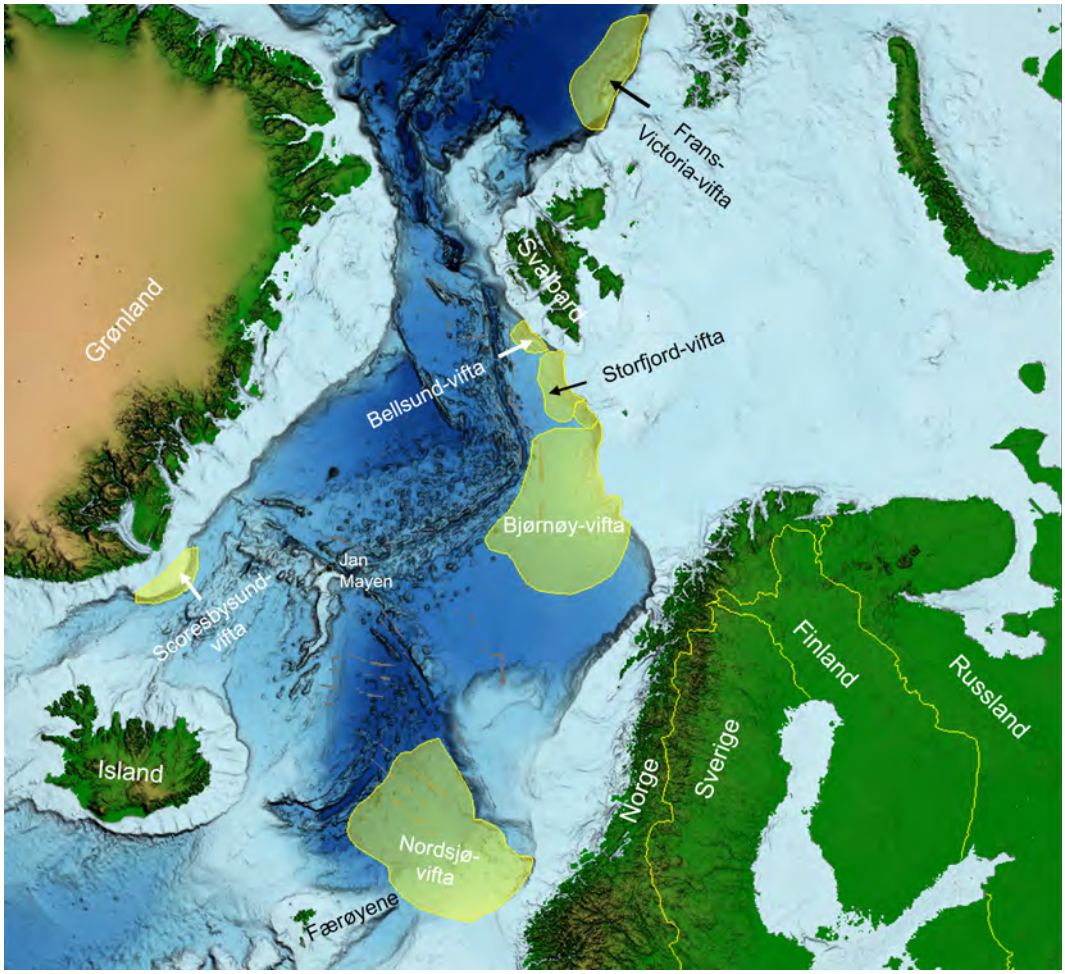

Fig. 4.25 Marine istidsvifter i Norskehavet og Grønlandshavet

Sedimenter fra Øst-Grønland vil i liten grad bli transportert ut til sjøfjellene nordvest for Mohnsryggen. Dette skyldes i hovedsak at sedimentene blir fraktet med den sterke øst-grønlandske havstrømmen sørover langs grønlandskysten. Ved Jan Mayen deler strømmen seg og får en gren som går østover. Dette bidrar antagelig til høyere sedimenttilførsel i den sørvestlige delen av utredningsområdet. Dette støttes av satellittdata som viser at det synes å være færre sjøfjell i det sørvestlige del av området enn lenger nordøst. Videre er det et abyssalt basseng vest for et topografisk trinn opp til sjøfjellene ved anomali 13 (C13) (Fig. 4.8). Dette bassenget kan fungere som en sedimentfelle og dermed begrense sedimentasjonen i områdene øst for anomali 13 der det ikke er beskrevet vesentlige havstrømmer.

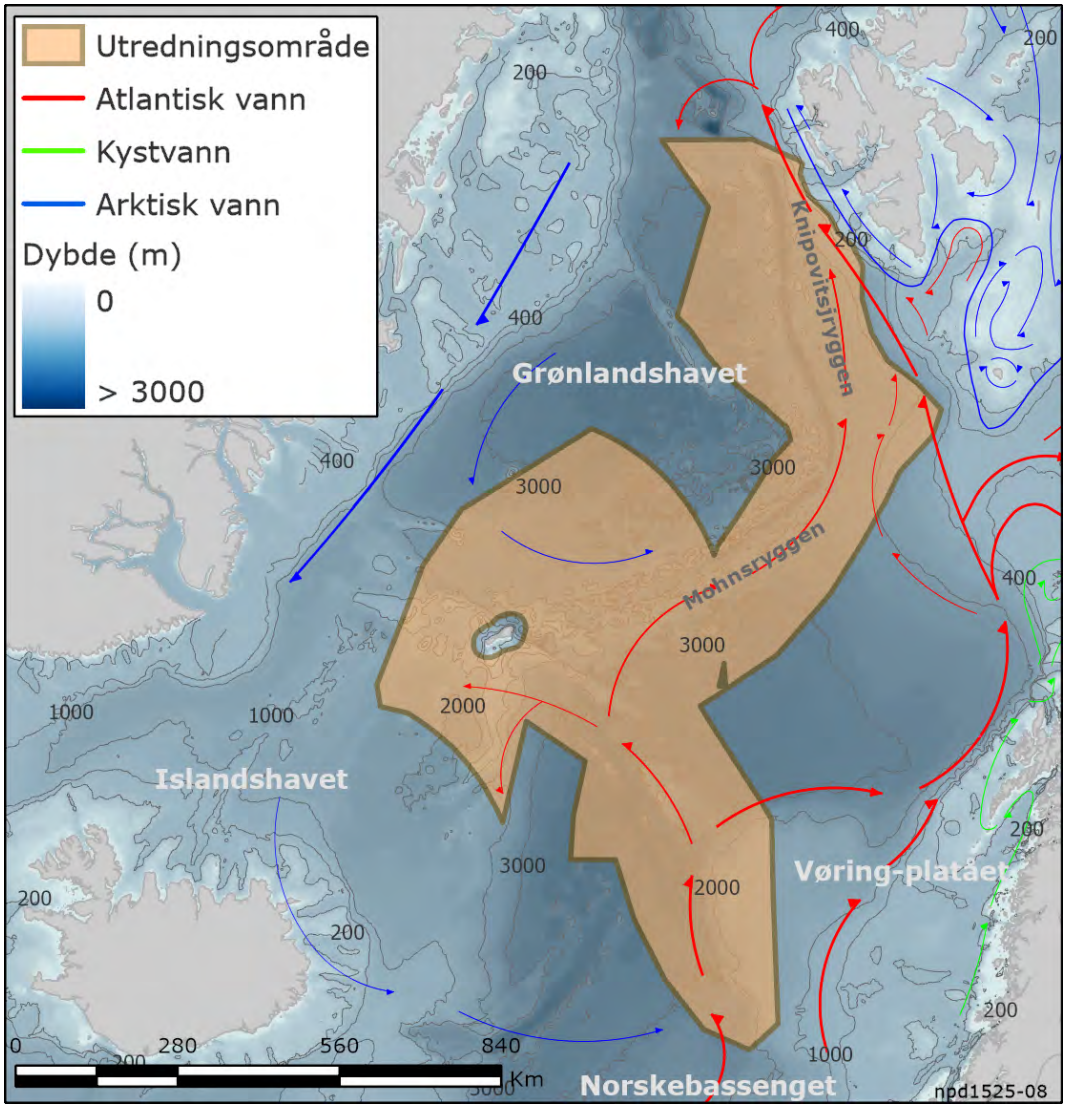

Fig. 4.26 Havstrømmer i Norskehavet og Grønlandshavet
Kart over Norskehavet med bunntopografi og viktigste havstrømmer (atlanterhavsvann - rødt, arktisk vann - blått, kystvann - grønt).

Type og konsentrasjon av grunnstoff i havvannet

Manganskorpene felles ut direkte fra havvannet og fester seg i tynne lag på sjøfjellene. Dersom overflaten ikke begraves av sedimenter eller raser ut, men forblir i direkte kontakt med sjøvann gjennom millioner år, kan utfellingene vokse til skorper som er flere titalls centimeter tykke. Manganskorper av denne typen dannes direkte fra sjøvann ved utfelling av jern-oksidhydroksid og mangan-hydroksid. Materialets høye spesifikke overflateareal og dipolare ladning gjør at det også tar opp en rekke sporstoffer fra sjøvannet (Hein et al., 2000).

Mengden av jern (Fe), mangan (Mn) og sporstoff i havvannet er i hovedsak bestemt av nærheten til kontinentalmarginen, oksygeninnholdet i vannkolonnen, nærheten til hydrotermal aktivitet og havstrømmene. I den periodiske tabellen (Fig. 4.27) er alle analyserte grunnstoff markert. Grunnstoff som er tatt med i ressursvurderingen for manganskorper er uthevet.

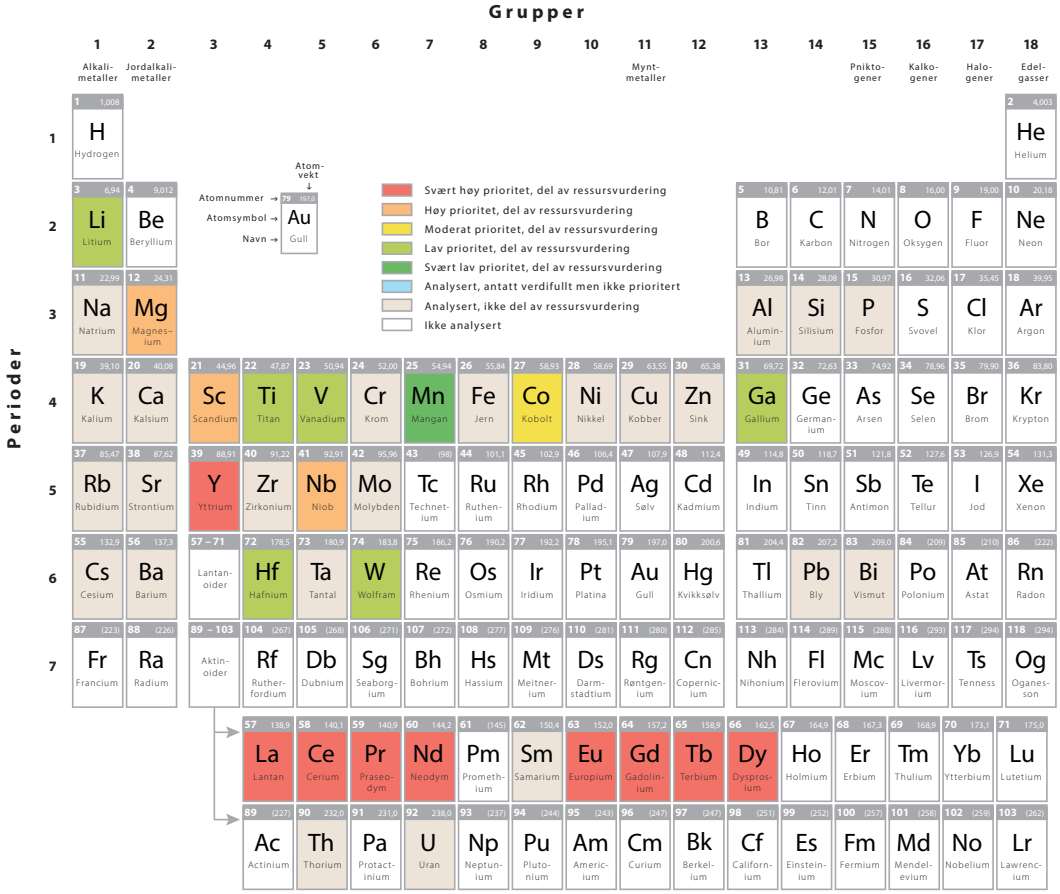

Fig. 4.27 Oversikt over grunnstoff analysert for i manganskorpe-vurderingene

Havstrømmer og lokale strømforhold

Siden manganskorper felles ut fra havvannet, vil sirkulasjon av havvann ha betydning for tilgang på jern, mangan og andre grunnstoff. Havstrømmene inneholder grunnstoff fra bl.a. sedimenter fra land og hydrotermal aktivitet. Dette fraktes rundt i havområdene. Fig. 4.26 viser de viktigste havstrømmene i Norskehavet og Grønlandshavet.

Bunntopografien styrer i stor grad havstrømmene og utveksling av vannmasser. Strømmene i Norskehavet og Grønlandshavet er i hovedsak dominert av en grunnere og varmere havstrøm som går nordover på østsiden og en dypere og kaldere havstrøm som går sørover på vestsiden. Den varme, norske atlanterhavsstrømmen som kommer opp fra sør deler seg ved Vøringutstikkeren, hvor en del går utover mot Jan Mayen og Mohnsryggen, og en del går nordover langs kysten av Norge. Lenger nord deler denne seg i en strøm inn i Barentshavet og en strøm nordover langs Spitsbergen. Deler av strømmen i dyphavet ved Mohnsryggen går nordover langs ryggen til Knipovitsjryggen og videre til Framstredet. Her sirkulerer den og blander seg med polare strømmer og danner den kalde øst-grønlandske strømmen sørover langs grønlandskysten.

Vi har lite kunnskap om strømforhold nær havbunnen.

4.4 Letemodeller for manganskorper

For ressursvurdering av manganskorper er utredningsområdet delt inn i fire regionale områder. Inndelingen er basert på sammenlignbare geologiske og topografiske hovedtrekk. De regionale områdene er delt inn i subområder for å speile variasjoner i tykkelse på skorpene.

Beregningen av mengden ressurser i hvert område er gitt ved:

(Volum[1] ressurser) x (Tetthet tørr bergart) = Tonn tørre ressurser i området

[1]Volumer beregnes ved hjelp av areal og tykkelse.

4.4.1 Volum

Skorpevolum kan beregnes når man kjenner arealet av områder som oppfyller kriteriene for vekst av manganskorpe, variasjoner i skorpetykkelser og har en modell for hvordan areal og tykkelse henger sammen.

For å illustrere beregningen av skorperessurser har OD brukt fire regionale områder:

- Området ved Vøringutstikkeren og Vøringplatået
- Jan Mayen Ryggen og sjøfjellene rundt
- NV og SØ for Mohnsryggen
- V og Ø for Knipovitsjryggen

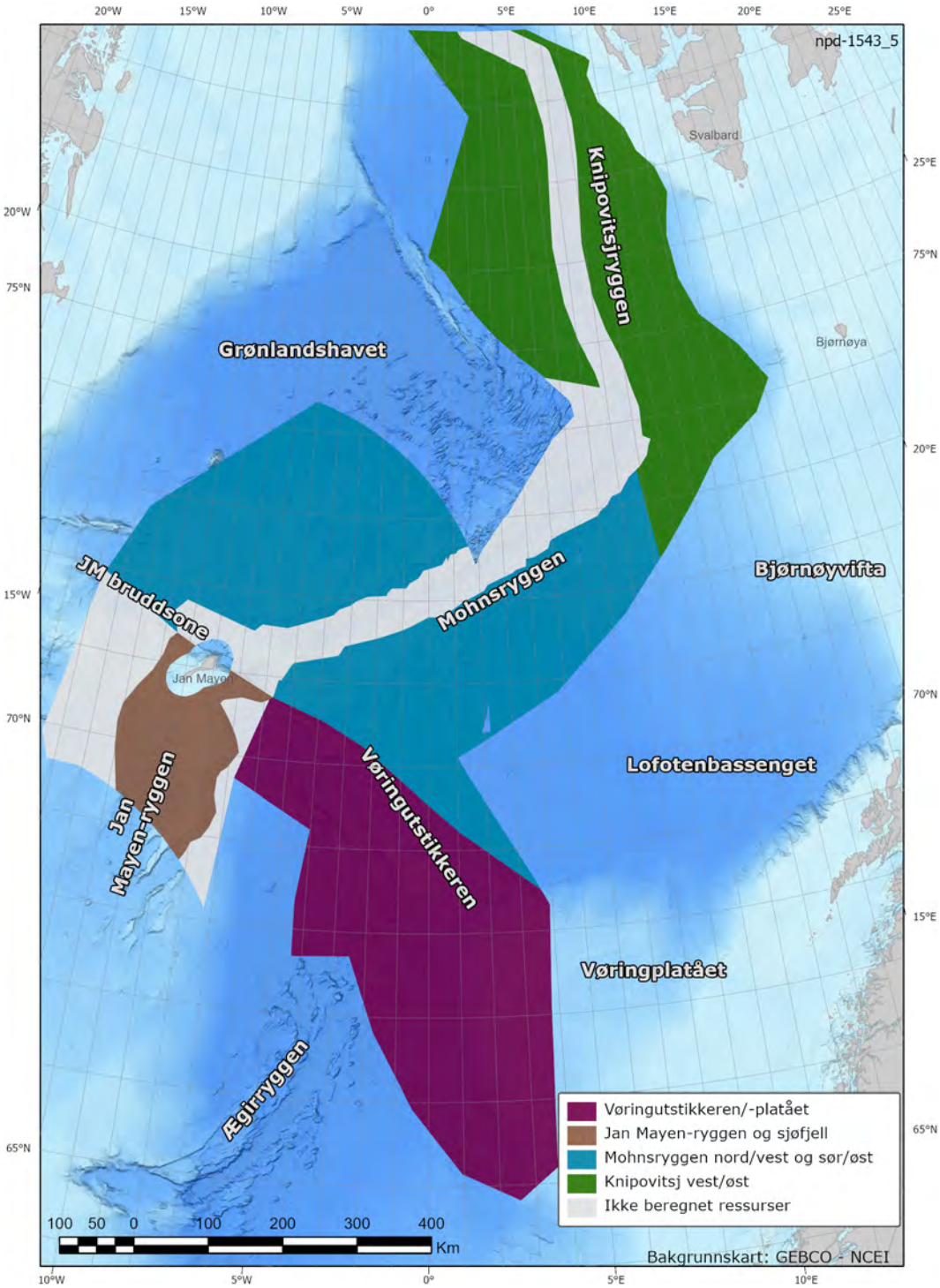

Fig. 4.28 Regionale områder for beregning av manganskorper
Hvert delområde har sammenlignbare geologiske og topografiske hovedtrekk.

Disse regionale områdene er delt inn i subområder. For hvert subområde er det beregnet størrelse på areal med helning over 20 grader, og det er valgt en tykkelsesspredning for subområdet. Fordi sjøfjellene er av varierende alder og har ulike geologiske egenskaper, må spredningen i mulig skorpetykkelse reflektere minimum, forventet og maksimum gjennomsnittstykkelse for hele subområdet. Dette vil være ulikt en minimum, forventet og maksimumsverdi for et gitt sjøfjell/-rygg innenfor subområdet.

Areal

Det er benyttet ca. 20 graders helning på terrenget for å skille mellom områder dominert av bløtbunn og skråninger/fjellsider med hardbunn. Denne grenseverdien bygger på kartlegging av sedimenttykkelser med bunnpenetrerende ekkolodd over store områder i aksedalen (Stubseid et al., 2023; Pedersen et al., 2021), samt en serie videotransekter med ROV opp skråninger med ulik og varierende helningsgrad. Kartleggingen viser at de hemipelagiske sedimentlagene tynner ut i områder med helning mellom 17 og 20 grader, og at hemipelagiske sedimenter ikke akkumuleres i vesentlig grad i brattere terreng. Økende helning av terrenget fører til ras og massetransport ned skåningene. Dokumenterte undersøkelser viser at skråninger på under 15-20 grader vil få sedimentdekning, mens i brattere skråninger vil sediment gli av og/eller rase ut. Det ser ut som manganskorper kan vokse også med noe sedimenttilførsel, hvor sedimentet fletter seg sammen med manganskorpen. Dette gjør at metallgehalten vil bli lavere enn i rene manganskorper uten sedimenttilførsel. I skråninger med helning på 20-30 grader ser man en blanding av mangankonsoliderte sedimenter, utraste sedimenter og relativt uforstyrret manganskorpevekst. Er skråningene på over 30 grader har manganforbindelsene fått feste seg på bart fjell relativt uforstyrret (Pedersen et al., 2021).

For å avgrense områder med skråninger på over 20 graders helning, er det brukt kartdata med 10-200 meters oppløsning (Fig. 4.29). I områdene som ikke er kartlagt med MBES er det blitt estimert areal med helning over 20 grader basert på nærliggende MBES-data med sammenlignbare geologiske og topografiske hovedtrekk. Beskrivelse av metode for utregning av areal finnes i kapittel 5.2 Metode for beregning av areal med helning over 20 grader.

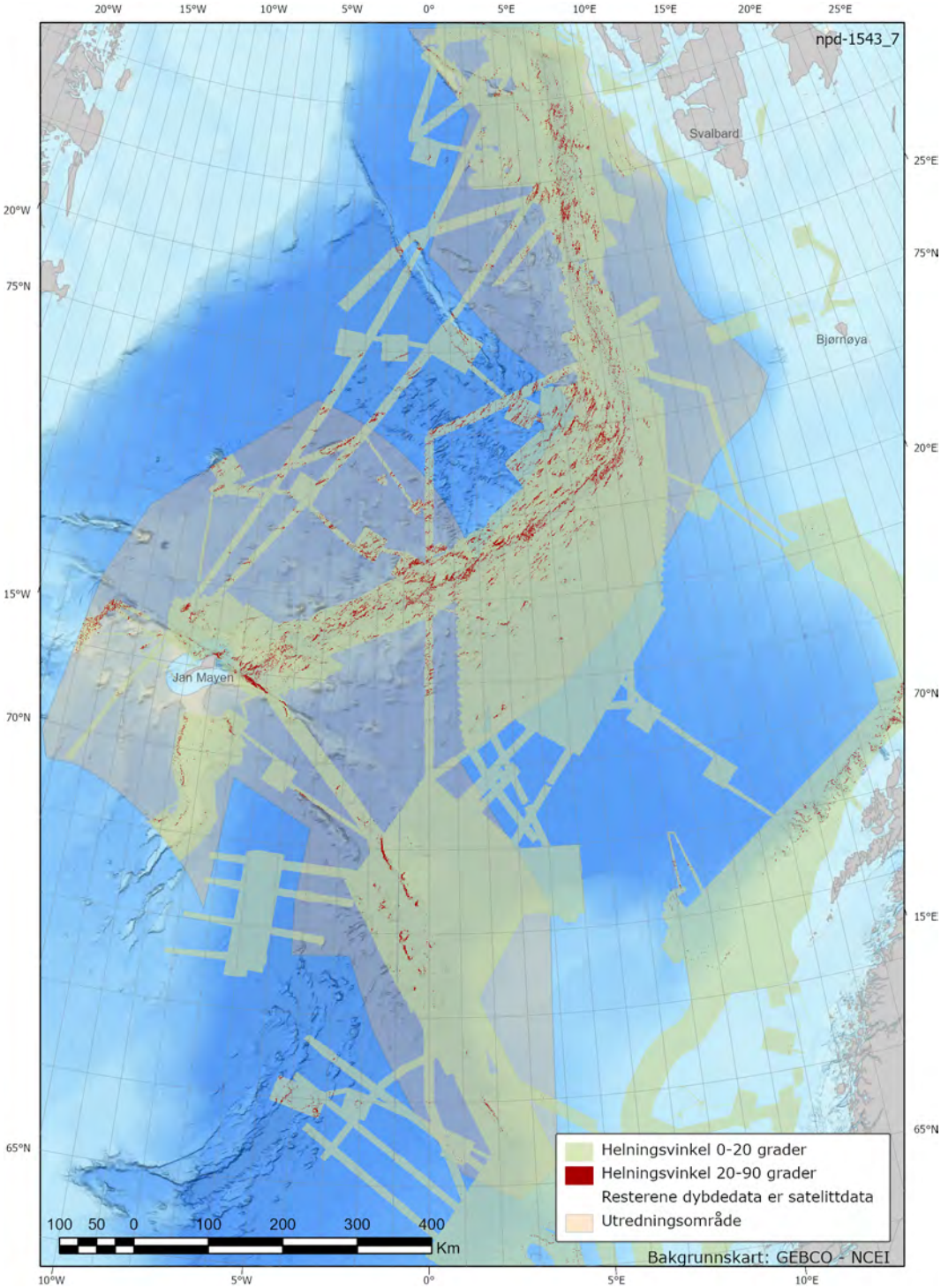

Fig. 4.29 Data brukt i arealberegningene
Kartet viser områder med helningsvinkel på over 20 grader.

Tabellen under oppsummerer arealet med helning på over 20 grader innenfor hver av de regionale områdene vist i Fig. 4.28

Tab. 4.11 Estimert areal på skråninger over 20 grader

Regionale områder	Forventningsverdi (km^2)
Området ved Vøringutstikkeren og Vøringplatået	888
Jan Mayen-ryggen og sjøfjellene rundt	528

NV og SØ for Mohnsryggen	5383
V og Ø for Knipovitsjryggen	1735
Total:	8534

Variasjoner i skorpetykkelse

En sammenstilling av spredning av gjennomsnittlige tykkelse brukt i ressursvurderingen innenfor de regionale områdene er summert i Tab. 4.12. Parameterne i tabellen tar høyde for at det er observert større variasjon i skorpevekst i stabile skråninger med 20 og 30 graders helning, enn på skråninger med over 30 graders helning.

Tab. 4.12 Oversikt over gjennomsnittlige tykkelsesvariasjoner for manganskorper per regionale område

Regionale områder	min (cm)	maks (cm)
Området ved Vøringutstikkeren og og Vøringplatået	2,5	32
Jan Mayen-ryggen og sjøfjellene rundt	1,5	10
NV og SØ for Mohnsryggen	2,5	32
V og Ø for Knipovitsjryggen	5	20

Jan Mayen-ryggen og sjøfjellene rundt

For å gi en indikasjon på variasjoner i skorpetykkelse i området på og rundt Jan Mayen er det inkludert skorpetykkelser fra Gilje et al. (in prep). Observasjoner og prøvetakning med ROV viser skorpeprøver med opp mot 20 cm tykkelse, mens gjennomsnittet var rundt 3 cm. Videobildene viser varierende geologiske egenskaper på underliggende fjellskråning. Vi forventer derfor at det kan finnes skråninger med over 20 graders helning der det kan være lite eller ingen manganskorpe.

Området ved Vøringutstikkeren og Vøringplatået

I området på og rundt Vøringutstikkeren og Vøringplatået er skorpetykkelser fra Gilje et al. (in prep) benyttet for å gi en indikasjon på tykkelsesvariasjonene. Her er den tykkeste skorpen over 20 cm og gjennomsnitts-tykkelsen målt på prøvene er rundt 5 cm. I likhet med Jan Mayen-ryggen viser videobilder fra kartleggingstokt varierende geologiske egenskaper til underliggende fjellskråning. Tilsvarende som for Jan Mayen-ryggen kan det finnes skråninger med over 20 graders helning der det kan være lite eller ingen manganskorpe.

NV og SØ for Mohnsryggen

I områdene nordvest og sørøst for Mohnsryggen er alder og de reologiske egenskapene til havbunnen relativt godt forstått (5.4.1 Dannelse av fjellandskapet og 5.4.2 Dannelse og vekst av manganskorper). Alderen på sjøfjellene varierer fra rundt 5 millioner år nærmest aksedalen og ut til over 40 millioner år ved grensen av utredningsområdet.

V og Ø for Knipovitsjryggen

Langs Knipovitsjryggen er alder av havbunnen mer usikker (5.4.1 Dannelse av fjellandskapet) og færre sjøfjell er kartlagt og prøvetatt med ROV. De geologiske egenskapene til sjøfjellene dannet i aksedalen antas å være relativt lik det man finner ved Mohnsryggen. Unntaket er Hovgaardryggen, der observasjoner indikerer mer ustabile fjellskråninger og lite manganskorpevekst.

4.4.2 Tetthet

Det er brukt tørr tetthet i utregningene. Det betyr at volumtallene som blir oppgitt i ressursvurderingen er tørre ressurser. Input-parametrene er basert på gjennomsnittlig tørr tetthet beskrevet av Hein et al. (2000).

For alle områdene er følgende benyttet:

Tab. 4.13 Tetthet (tørr) brukt i modellering av skorpeforekomster

	min	forventet	maks
Tørr tetthet manganskorpe	1,25	1,3	1,35

4.4.3 Metallgehalt

I overkant av 100 prøver er analysert for 48 forskjellige grunnstoff. Det er utført en ressursvurdering på 20 av disse grunnstoffene. Analysene er gjort av UiB på prøver som samlet inn på samarbeidstokt med UiB gjennom de siste 12 årene.

Spredningen i gehalter er delt inn i fire områder: Vøringutstikkeren, Jan Mayen-ryggen, Mohnsryggen og Knipovitsjryggen. Prøver innsamlet på tokt til Knipovitsjryggen i november 2022 er ikke ferdig analysert. Derfor har vi benyttet fordeling i gehalter fra Mohnsryggen i dette området. Når det foreligger analyser fra bergartsprøver samlet inn på tokt til Knipovitsjryggen, vil de gi grunnlag for en ny vurdering. Tabell med alle gehalter som er brukt i ressursvurderingen er oppsummert i 7.3 Tabeller for gehalter i manganskorper.

4.5 Manganskorpe-eksempel sjøfjell nordvest i Grønlandshavet

For konkretisering er det gjort mer detaljert modellering i form av et regneeksempel på et sjøfjell nordvest i Grønlandshavet (i utredningsområdet), i et område som er kartlagt, og hvor det er påvist manganskorper.

Prospektivt areal og skorpetykkelser

Som eksempel er det valgt et sjøfjell nordvest for Mohnsryggen. Det befinner seg nordvest i Grønlandshavet, 350 km nord for Jan Mayen. Sjøfjellet er kartlagt med skipsbatymetri (30 meters oppløsning) og det er brukt ROV for å samle inn bergartsprøver, film og stillbilder. Data ble samlet inn med forskningsfartøyet G.O.Sars sommeren 2022 under et samarbeidstokt mellom Senter for dyphavsforskning ved UiB og OD. Havdypet er mellom 2500 meter på toppen av sjøfjellet ned til 3800 meter ved foten av fjellet. Prøvene av manganskorpe er samlet inn i fjellskråninger med over 20 graders helning (4.4 Letemodeller for manganskorper)

Metoden for å beregne areal med helning på over 20 grader er den samme som er benyttet i hele utredningsarealet. For beskrivelse se kapittel 5.2 Metode for beregning av areal med helning over 20 grader.

Arealet for forekomsten er vist i det røde polygonet i Fig. 4.30 . Her er 596 km^2 dekket med skipsbatymetri. Dette utgjør 66 pst. av arealet i polygonet. I denne delen av polygonet har 14,8 pst. av arealet en helning på mer enn 20 grader.

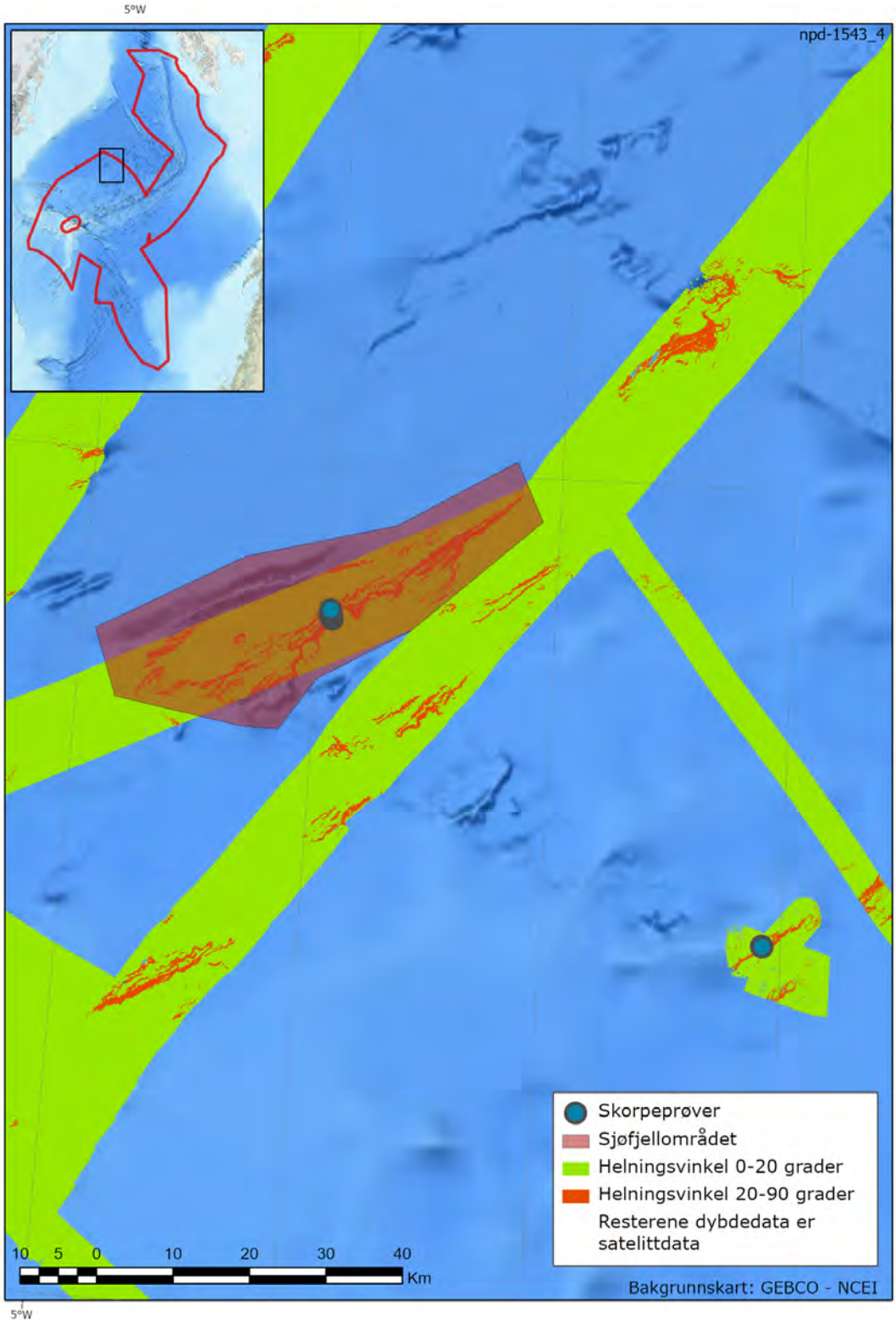

Fig. 4.30 Sjøfjell beliggende nordvest i Grønlandshavet
Kart som viser lokasjonen til sjøfjellet og lokalitetene til skorpeprøvene som er blitt analysert.

Basert på metoden i kapittel 5.2 Metode for beregning av areal med helning over 20 grader, kan vi da beregne at det resterende arealet i polygonet (34 pst. uten MBES-data) har samme fordeling av helning, altså at 14 pst. av dette arealet er over 20 grader. Dette betyr at det er tilsammen 133 km^2 som har mer enn 20 graders helning og som utgjør prospektivt areal innenfor sjøfjellområdet (Fig. 4.30).

Skipsbatymetrien har en oppløsning på 30 meter og det er usikkerhet rundt det faktiske arealet med helning på over 20 grader. Dette er ivaretatt ved å benytte en usikkerhet på +/- 20 pst. for areal over 20 grader i forekomsten:

Tab. 4.14 Spredning i modellert areal for sjøfjell nordvest i Grønlandshavet

P95 (km^2)	Forventningsverdi (km^2)	P05 (km^2)
106,5	133	159,5

Det benyttes samme usikkerhet i hele polygonet for dette sjøfjellet.

Basert på den geologiske spredningshistorikken for Mohnsryggen, samt de magnetiske anomaliene, er det estimert at området er rundt 40 millioner år gammelt. Prøver tatt med ROV viser manganskorper med tykkelser på opp mot 40 cm i de bratte fjellskråningene. Dette indikerer en vekstrate på rundt 1 cm per millioner år, noe som samsvarer med andre målinger lengre øst i Grønlandshavet.

Ettersom det er observert variasjon i skorpevekst i skråninger på mellom 20 og 30 grader, og det er usikkert om målte tykkelser er representativt for alle skråningene på forekomsten, er det lagt inn en spredning på tykkelsen som reflekterer dette.

Geokjemi

For det utvalgte sjøfjellet har UiB analysert 15 manganskorpeprøver samlet inn i den nordlige delen av Grønlandshavet i 2022. Det er analysert for 48 forskjellige grunnstoff og utført resursvurdering på 20 av disse. En oversikt over analyseresultatene finnes i kapittel 7.3 Tabeller for gehalter i manganskorper .

Ressursvurderingen dette sjøfjellet er beskrevet i kapittel 6.2.2 Sjøfjell manganskorperessurser.

1 International Ocean Discovery Program, tidligere Ocean Drilling Program.

5 Metode for beregning av mineralressurser

5.1 Modelleringsverktøy

Denne ressursvurderingen er første gang det gis en helhetlig ressursvurdering for havbunnsmineraler på norsk sokkel. Ressursvurderingen er basert på Oljedirektoratets (OD) sine kartleggingstokt supplert med andre data og vitenskapelig arbeid. OD modellerer med flere stokastiske metoder for å kvalitetssikre resultatene.

5.1.1 GeoX

OD benytter GeoX for å utarbeide ressursestimat for uoppdagede petroleumsressurser i prospekter og letemodeller. GeoX er et sett med verktøy for stokastiske beregninger av petroleumsressurser og -verdier i letefasen. GeoX ble utviklet av det norske selskapet GeoKnowledge AS, som senere ble kjøpt av oljeserviceselskapet Schlumberger.

GeoX er ikke tilrettelagt for å beregne mineralressurser, men beregningsmodellene kan likevel brukes for slike beregninger med noen tilpasninger og begrensninger. Vi har benyttet GeoX for beregning av sulfidforekomster i en tidlig fase i denne ressursvurderingen. Vi har også brukt GeoX til å validere våre egne modeller laget i @RISK som er beskrevet i kap.5.1.2 @RISK.

5.1.2 @RISK

@RISK er en software – en Excel Add-In – for å bygge egne modeller for Monte Carlo-simulering uten programmering. Andre beslutningsstøtte-verktøy, bl.a. Precision Tree (lager beslutningstrær), kan brukes sammen med @Risk.

Med @RISK er det lett å bygge ut og teste modeller, og det er mer fleksibelt enn ferdigprogrammerte verktøy som GeoX. Excel er et kjent brukergrensesnitt. Med @RISK kan man bruke egne begreper/navn, og man har ikke de begrensninger som er i GeoX mht. antall metaller som kan estimeres.

@RISK er filbasert, så resultater som skapes ligger i den enkelte fil. Det er ingen database i bunnen som tilbyr uttrekk av data, lagringssikkert og tilgangssikkerhet. Derfor fordres god versjonskontroll på modeller.

5.1.3 Ranged Approach to Target and Inventory Estimates

"Ranged Approach to Target and Inventory Estimates" kom opprinnelig fra ressursestimering i petroleum (BP) til landbasert mineralutvinning (BHP), og er etter sigende ‘best practice’ for stokastisk modellering av landbaserte mineraler. "Ranged Approach" er et tidligfase hjelpemiddel for ressursvurdering og etablering av et "Mineral Inventory". Et "Mineral Inventory" forutsetter ikke at mineralene kan utvinnes, ei heller at en forretningsidé skal være modnet frem til en forretningsmulighet. Det er "Mineral Inventory" som modelleres – ikke "Mining Inventory".

"Ranged Approach" følger seks steg frem til et "Mineral Inventory":

1. Utarbeide faktakart for geografisk å definere og avgrense prosjektet
2. Klassifisere dataene i prosjektet, oppdelt i
   a. Fakta
   b. Tolkninger
   c. Antakelser
   d. Ukjente faktorer
3. Utarbeide et geologisk influensdiagram/flytdiagram for ressursakkumulasjonen, samt bestemme geologiske nøkkelfaktorer i diagrammet
4. Etablere tre (eller flere) deterministiske ressursutfall, oppdelt i
   a. Minimumsanslag (garantert minimum)
   b. Maksimumsanslag (kan ikke bli større)
   c. Mest sannsynlige utfall (typetall/modalverdi)
   d. (Ev. flere case for ressursutfall på halene – som 10 pst. High – dersom max-min gjør troverdig modellering krevende
5. Fastsette hvorledes tykkelse, horisontal kontinuitet og gehalt ('Grade') skal ivaretas i modelleringen
6. Stokastisk modellering av utfallsrommet for "Mineral Inventory"

5.2 Metode for beregning av areal med helning over 20 grader

Metoden for beregning av areal for manganskorper er i hovedsak gjennomgått i 4.4 Letemodeller for manganskorper. Detaljer om metoden er utdypet nedenfor.

Det er utarbeidet helningskart innenfor utredningsområdet med formål å tallfeste arealer med gitte helningsgrader. Med helning menes hvor bratt det er i et område.

Det er benyttet dybdedata (MBES) med oppløsning ned mot 10 meter (se kap. 3 Oljedirektoratets kartleggingsarbeid). Variasjon i oppløsningen ligger mellom 10 og 200m.

Data ble konvertert til celler på 25 x 25 meter. Helningsgrad for hver celle er beregnet ved å bruke dybde i hver celle og tilgrensende celler. Disse ble videre klassifisert i ulike kategorier. Antall celler i hver kategori ble så brukt for å beregne arealet pr. kategori.

Helning i områder uten MBES-data ble ekstrapolert fra tilliggende områder med MBES datadekning. For å ta hensyn til ulik topografi ble satelittdata benyttet for å definere områder for ekstrapolering. (Fig. 4.28) Disse subområdene er delt inn i delområder basert på lignende topografisk karakter for å ta hensyn til at «fjelltetthet» varierer i utredningsområdet. Det er for eksempel ulik grad av begraving av sjøfjell i de ulike områdene av utredningsarealet.

I ressursvurderingen er det benyttet usikkerhet for areal av sjøfjell. Det er større usikkerhet i områder hvor det kun finnes satelittdata. Tilsvarende er det lavere usikkerhet i områder med MBES data. I områder med MBES data er det valgt en usikkerhet på +-20%. I områder med kun satellittdata er det valgt en usikkerhet på +-50%. Disse verdiene er satt basert på ODs erfaring med tilsvarende arbeid innenfor estimering av uoppdagede ressurser i petroleum. Ved å vurdere sensitiviteter vil en slik usikkerhet bli mer velfundert. Dette vil inkluderes i fremtidig arbeid.

5.3 Ressursklassifikasjon

Forvaltningen av ressurser er en viktig oppgave for enhver nasjonalstat. En standardisert og funksjonell klassifisering av ressursene er en avgjørende forutsetning for:

- Utforming av internasjonal energi- og mineralpolitikk
- Myndighetenes ressursforvaltning
- Industriens aktivitetsplanlegging
- Finansanalyser og kapitalallokering

OD utviklet i 1996 et klassifikasjonssystem for petroleumsressurser. Dette systemet er basert på prosjektmodenhet, og ble sist oppdatert iht. ny ressursforskrift i 2018 (Oljedirektoratet, 2018).

Definisjoner

Ressurs: er elementer eller menneskelige egenskaper som kan utnyttes økonomisk, eller som er til nytte på annen måte[1]. Naturressurser er luft, vann, dyrkbare arealer, petroleum, mineraler og andre råstoffer. Man skiller gjerne mellom fornybare og ikke-fornybare ressurser[2].

Klassifikasjon: er en sammenstilling av ting eller omgrep i grupper eller klasser etter hvor like de er. Ordet klassifikasjon blir også brukt om resultatet av ei slik sammenstilling. Klassifikasjon spiller en viktig rolle både i det daglige og i vitenskapelige sammenhenger, for å få oversikt, økt innsikt og forståelse[3].

Malm: bergart som inneholder ett eller flere mineraler eller grunnstoffer i økonomisk drivverdige mengder[4].

I denne rapporten benyttes ikke begrepet malm, heller vil begrepet ressurser (knyttet til havbunnsmineraler) bli benyttet.

Klassifiseringssystemer

Det eksisterer flere ulike systemer for ressursklassifisering, de mest relevante for havbunnsmineraler er:

- UNFC: United Nations Framework Classification for Resources[5][6][7]
- CRIRSCO: Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards[8]

To andre klassifikasjonssystem som ofte er benyttet og referert er:

- Petroleum Resources Management System (PRMS)[9]
- EUs taksonomi[10]

Disse to siste vil ikke bli omtalt videre her – PRMS er relatert til petroleum og EUs taksonomi er et system som i hovedsak er laget for styring av finansielle virkemiddel mot bærekraftige investeringer.

Institusjoner og gjeldende rammeverk

I Norge er mineralforvaltningen på land ivaretatt av Direktoratet for mineralforvaltning med Bergmesteren for Svalbard (DMF) og Norges geologiske undersøkelse (NGU), se kapittel 2 Innledning.

Forvaltningsansvaret for havbunnsmineraler på norsk sokkel er lagt til Olje- og energidepartementet, og ODer er departementets fagetat på området.

Den internasjonale havbunnsmyndigheten (International Seabed Authority - ISA) er opprettet under FNs Havrettskonvensjon for å forvalte ressursene i de internasjonale havbunnsområdene på vegne av menneskeheten. ISA har 167 medlemsland, deriblant Norge.

5.3.1 Beskrivelse av ressursklassifiseringssystem

UNFC sitt klassifikasjonssystem for ressurser omfatter en rekke naturressurser: mineraler, petroleum, energi – også fornybar, antropogene, hydrogen etc., og det er nært knyttet til FNs mål for bærekraftig utvikling og bærekraftmålene («2030 Agenda»)[11]. OD har siden 2009 presentert ressursregnskap for petroleum i samsvar med UNFC-systemet.

Rammeverket for UNFC klassifikasjonssystem består av tre akser med ulik grad av modenhet for prosjekter / ressurser: G-aksen for geologi / undergrunn, F-aksen for teknisk modenhet («Feasibility») og E-aksen for sosio-økonomiske forhold («Economy/ Environment»).

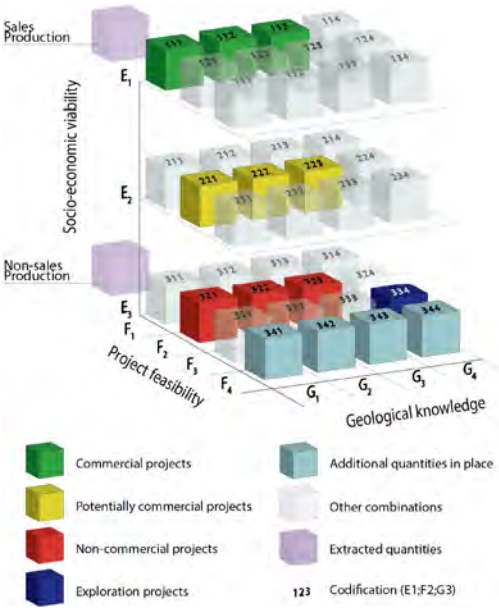

Fig. 5.1 FNs rammeverk for ressursklassifikasjon
United Nations Framework Classification for Resources - UNFC.

Den internasjonale havbunnsmyndigheten – ISA – har tidligere (2015) publisert et forslag til klassifisering av havbunnsmineral-ressurser som er basert på CRIRSCO[12], men ISA vurderer også å benytte UNFC for ressursklassifisering[13]. Det er utarbeidet et «Bridging document» mellom UNFC og CRIRSCO[14], og det er tilsvarende laget «bridging document» for mineralressurser på land i Finland, Norge og Sverige, koblet mot UNFC[15].

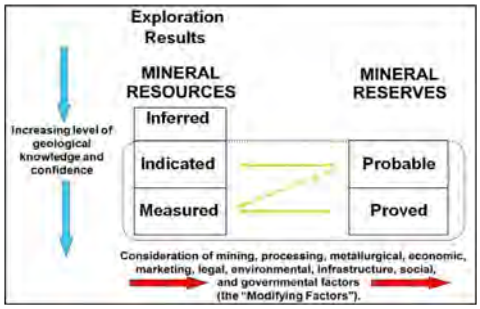

Fig. 5.2 CRIRSCO klassifisering
Viser sammenheng mellom leteresultater, mineralressurser og -reserver.

Begrepene «ressurser» og «reserver» kan være begrep som er vanskelig å forholde seg til, blant annet fordi noen ressurstyper og reserver er strengt definert i finansmarkedet. Som NGU beskriver i sin mineralstatistikk/ ressursrapport (Heldal et al, 2017):

I grove trekk er en "reserve" et nøye oppmålt volum av malm eller annen bergart som man vet er produserbar og økonomisk lønnsom ut fra dagens marked. I realiteten gjelder dette aktive bergverk eller nye bergverk like før oppstart. Det er meget dyrt å fremskaffe nok

informasjon til å definere reserver, derfor har mange selskap lagt seg på en kost-nyttelinje der man har reserver for 10-12 år, tilstrekkelig for å tilfredsstille investorer og aksjonærer. En "ressurs" kan derimot være både et nøye oppmålt volum eller et løsere estimat, der det ikke er like stor sikkerhet for at volumet er produserbart og lønnsomt. Ressurser kan altså inkludere reserver i en mer nøytral kontekst.

I ressursklassifikasjon skilles det også mellom tilstedeværende og utvinnbare ressurser. Oppdelingen i ulike kategorier reflekteres også i systemer som UNFC og CRIRSCO.

En beskrivelse av UNFCs geologiske ressursdata er gitt i Tab. 5.1. Det er beskrevet fire kategorier fra G1 (svært stor sikkerhet) til G4 (estimat med liten sikkerhet). Denne tilnærmingen er også i overensstemmelse med NGUs ressursklassifisering på land.

Tab. 5.1 Beskrivelse av UNFC-kategoriene G1 til G4

G1	Ressursvolum tilknyttet kjente forekomster, som kan beregnes med stor grad av sikkerhet (inkluderer påviste reserver og påviste ressurser)
G2	Ressursvolum tilknyttet kjente forekomster, som kan beregnes med moderat grad av sikkerhet (inkluderer sannsynlige reserver og indikerte ressurser)
G3	Ressursvolum tilknyttet kjente forekomster, som kan beregnes med lav grad av sikkerhet (inkluderer estimerte ressurser)
G4	Usikre ressursvolum tilknyttet mulige forekomster, basert på grove estimater, indirekte estimater eller overslag basert på statistiske sannsynligheter NB; inkluderer ikke-standardiserte historiske data som ikke er nærmere vurdert.

Med det eksisterende grunnlaget for kartleggingen av havbunnsmineraler på norsk sokkel, har OD ikke grunnlag for å kategorisere noen ressurser som reserver, se 6.1 Ressursberegning.

1 ressurs (2023) i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra: http://snl.no/ressurs (Hentet 24. januar 2023).
2 naturressurs (2023) i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra: https://snl.no/naturressurs (Hentet 24. januar 2023).
3 Ådland, Marit Kristine (2023) klassifikasjon i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra: http://snl.no/klassifikasjon (Hentet 24. januar 2023).
4 Rui, Ingolf Jarle (2023) malm i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra: http://snl.no/malm (Hentet 24. januar 2023).
5 UNFC (og UNECE) (2023): https://unece.org/sites/default/files/2020-12/UNFC2020.pdf (Hentet 24. januar 2023).
6 UNFC og mineraler (2023): https://unece.org/sustainable-energy/unfc-and-sustainable-resource-management/unfc-and-minerals (Hentet 24. januar 2023).
7 UNFC og CRIRSCO (2023): https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/Revised_CRIRSCO_Template_UNFC_Bridging_Document.pdf (Hentet 24. januar 2023).
8 CRIRSCO: Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (2023). Etablert i 1994, medlemmer er JORC (Australasia), CBRR (Brazil), CIM (Canada), Comision Minera (Chile), CCRR (Colombia), PERC (Europe (mainly UK)), NACRI (India), KCMI (Indonesia), KAZRC (Kazakhstan), MPIGM (Mongolia), OERN (Russia), SAMCODES (South Africa), UMREK (Turkey), SME (United States of America)). https://www.crirsco.com (Hentet 24. januar 2023).
9 PRMS: Petroleum Resources Management System (2023): et etablert system for klassifisering av petroleumsressurser – utarbeidet over flere år og forankret i SPE/WPC/AAPG/SPEE/SEG. https://www.spe.org/en/industry/reserves/ (Hentet 24. januar 2023).
10 EUs taksonomi: et klassifikasjonssystem for bærekraftig aktivitet forankret i «European green deal» og har hovedvekt på finansiell aktivitet (styring). https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en (Hentet 24. januar 2023).
11 FNs mål for bærekraftig utvikling er De forente nasjoners (FN) felles arbeidsplan for å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030. De består av 17 hovedmål og 169 delmål. Bærekraftsmålene skal fungere som en felles global retning for land, næringsliv og sivilsamfunn. https://unsdg.un.org/2030-agenda (Hentet 24. januar 2023).
12 ISA 2015: Recommendations for the guidance of contractors on the content, format and structure of annual reports – Annex V: Reporting standard of the International Seabed Authority for mineral exploration results assessments, mineral resources and mineral reserves: https://isa.org.jm/files/files/documents/isba-21ltc-15_1.pdf (Hentet 24. januar 2023).
13 Bruk av UNFC av ISA: https://unece.org/sustainable-energy/news/unfc-under-consideration-international-seabed-authority-classification (Hentet 24. januar 2023).
14 Bridging mellom UNFC og CRIRSCO: https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/Revised_CRIRSCO_Template_UNFC_Bridging_Document.pdf (Hentet 24. januar 2023).
15 Bridging mellom UNFC og mineraler på land i Finland, Norge og Sverige: https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/2018/UNFC_Nordic_guidelines/180212_A_guidance_for_the_application_of_the_UNFC.pdf (Hentet 24. januar 2023).

6 Ressursvurdering

6.1 Ressursberegning

De to typene av havbunnsmineraler som er påvist på norsk kontinentalsokkel, sulfider og manganskorper, er geologisk sett svært forskjellige. Ressursgrunnlaget i hver av dem er et resultat av hvordan de er blitt dannet og hvordan de forekommer. De ressursberegnes derfor hver for seg som beskrevet i de påfølgende avsnittene. Metoden som er benyttet for beregning av tilstedeværende ressurser for havbunnsmineraler er «Mineral Inventory», som beskrives i kapittel 5.1.3 Ranged Approach to Target and Inventory Estimates. De totale ressursene for manganskorpe og sulfider er beregnet for et stort område (se Fig. 6.1 og Fig. 6.2) og har ikke blitt klassifisert i UNFC-kategorier. De individuelle sjøfjellene og sulfidforekomstene kan ev. klassifiseres i kategori G4 og G3.

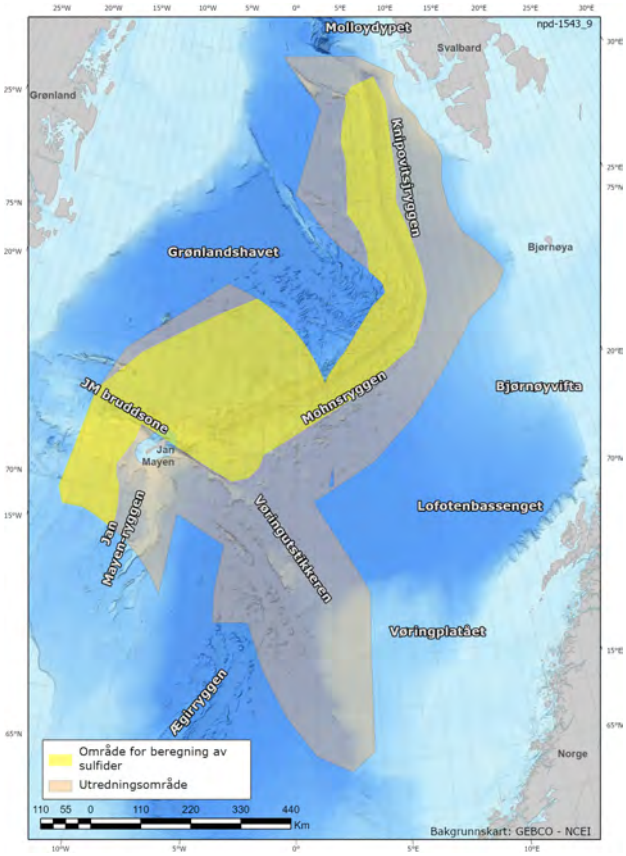

Fig. 6.1 Område for ressursberegning for sulfider

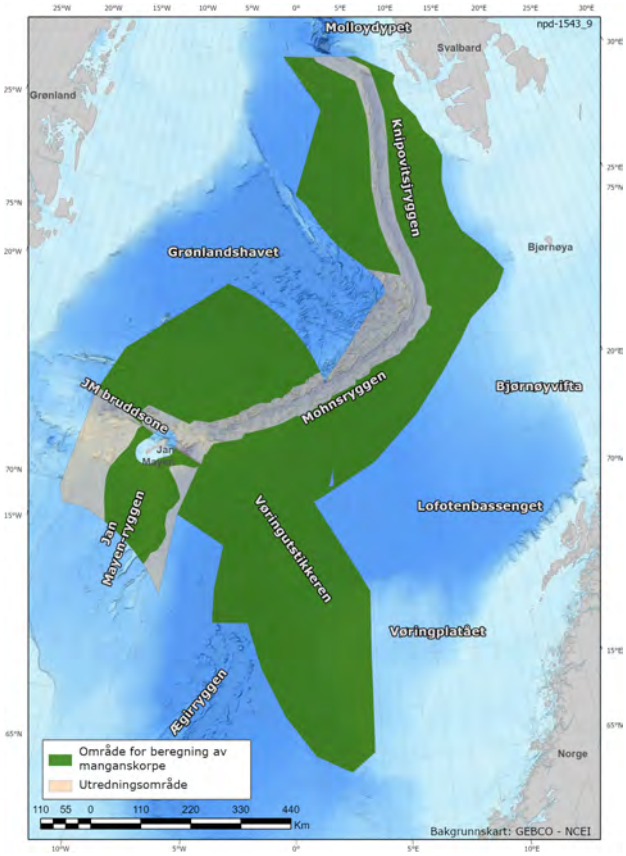

Fig. 6.2 Område for ressursberegning for manganskorper

6.1.1 Sulfidressurser

6.1.1.1 Beregningsgrunnlaget

Ifølge 4.1.1 Dannelsen av sulfidforekomster - aktiviteten i aksedalen er sulfidforkomstene delt i to hovedtyper alt etter hvor de er dannet i forkastningssystemene i aksedalen i spredningsryggene. Flankeforekomstene dannes langsetter de store hovedforkastningene som utgjør flankene av aksedalen. Aksialforekomstene dannes i vulkanske rygger som utvikler seg over forkastninger i sentrale deler av aksedalen. Som forklart i 4.1.1 Dannelsen av sulfidforekomster - aktiviteten i aksedalen gir disse forholdene grunnlaget for å definere de to hoved-

letemodellene som brukes i ressursvurderingen: hhv flankemodellen og aksialmodellen. Flankemodellen er delt i to underpopulasjoner: forekomster med mer enn 0,1% Co i gjennomsnitt og forekomster med mindre. I tillegg er det opprettet en tredje letemodell for to områder med vesentlig grunnere vann enn resten av området: langs Kolbeinseyryggen i sørvest og i et område med magmatisk oppbygninger rett nord for Jan Mayen (se 4.1.5 Letemodeller for sulfidforekomster).

For hver letemodell er det definert et sett av nødvendige parametere som inngår i beregningene. Disse er som følger:

Areal (m^2), Tykkelse (m), Tetthet (tonn/m^3), Gehalt (%, ppm), og Antall forekomster

Beregningen av mengden sulfid i hver letemodell er gitt ved den generelle formelen:

Tonn sulfid = Areal (m^2) x Tykkelse (m) x Tetthet (tonn/m^3) x Antall

Beregningen av mengden metall i hver letemodell følger da ved den generelle formelen:

Tonn metall = Tonn sulfid x Gehalt

Beregningen av ressursene i hver letemodell er gjort ved Monte Carlo-simulering med programmet @Risk. Denne simuleringen krever at tallverdiene for parameterne oppgis med spredning; minimum, gjennomsnitt og maksimum. I 4.1.5 Letemodeller for sulfidforekomster er det redegjort for hvordan, og med hvilken begrunnelse, man har valgt parameterne og fastsatt tallverdiene deres for beregningene av sulfidressursene.

6.1.1.2 Resultater

Resultatene av beregningene er gitt i de følgende tabeller og grafer. I Tab. 6.1 vises estimerte mengder av metallene kobber, sink, kobolt, sølv og gull totalt for alle letemodeller. For hvert metall er det oppgitt en forventningsverdi samt et lavt (P95) og høyt (P05) estimat. Tilsvarende er vist i 7.4 Ressurstabeller for letemodeller og delområderfor de enkelte letemodellene.

Tab. 6.1 Totale mengder metaller i alle sulfid letemodeller

Metall	P95	Forventning	P05
Cu (mill tonn)	28,4	38,1	47,6
Zn (mill tonn)	35,6	45,0	54,2
Co (mill tonn)	0,6	1,0	1,3
Ag (tonn)	64 870	85 200	105 530
Au (tonn)	1 755	2 317	2 856

I Fig. 6.3 er vist den resulterende sannsynlighetsfordelingen for total mengde kobber i de tre letemodellene. På fordelingen er også angitt P95- og P05-verdiene. Tilsvarende fordelinger er gitt for de øvrige metallene i figurene Fig. 6.4, Fig. 6.5, Fig. 6.6 og Fig. 6.7

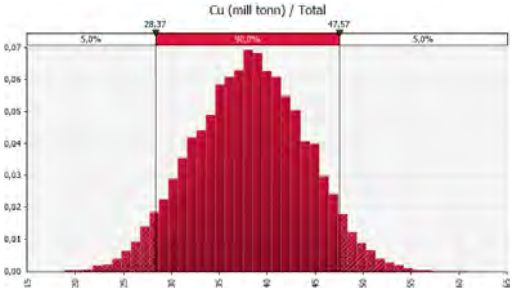

Fig. 6.3 Sannsynlighetsfordeling for total mengde kobber

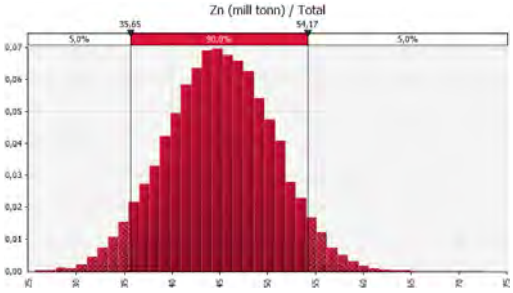

Fig. 6.4 Sannsynlighetsfordeling for total mengde sink

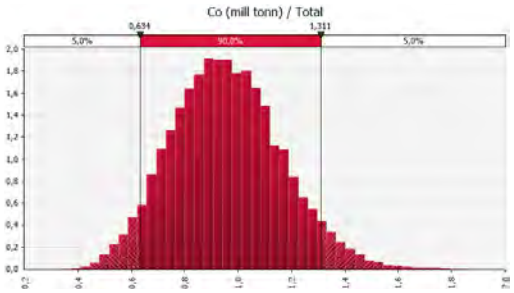

Fig. 6.5 Sannsynlighetsfordeling for total mengde kobolt

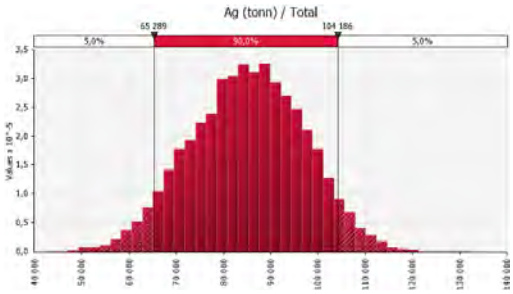

Fig. 6.6 Sannsynlighetsfordeling for total mengde sølv

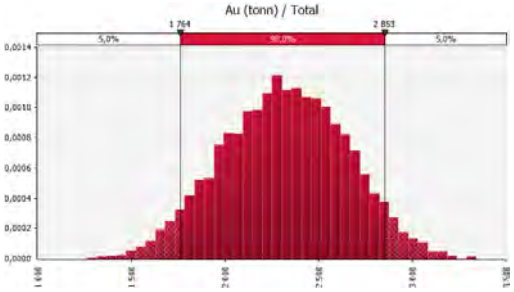

Fig. 6.7 Sannsynlighetsfordeling for total mengde gull

6.1.2 Manganskorpe-ressurser

6.1.2.1 Beregningsgrunnlaget

Dannelsen av manganskorpe vil være avhengig av minst fem viktige faktorer:

1. Alder på fjellandskapet
2. Stabilitet og helning av fjellskråninger
3. Sedimenttilførsel og avstand til kontinenter,
4. Type og konsentrasjon av grunnstoff i havvannet,
5. Havstrømmer og lokale strømforhold.

Disse faktorene er nærmere beskrevet i kapittel 4.3.2 Dannelse og vekst av manganskorper.

Basert på forskjeller i geologisk utvikling av fjellandskapet (4.4 Letemodeller for manganskorper) er utredningsområdet delt inn i fire regionale områder. For hvert av disse regionale områdene er det definert subområder med prospektivt areal, manganskorpe-tykkelser og metallgehalter.

For hvert subområde er det definert parametere som inngår i beregningene:

Areal over 20 grader (m^2), Tykkelse (m), Tørr Tetthet (tonn/m^3), Gehalt (%, ppm)

Beregningen av mengden mangan i hvert subområde er gitt ved den generelle formelen:

Tonn Manganskorpe = Areal (m^2) x Tykkelse (m) x Tørr Tetthet (tonn/m^3)

Beregningen av mengden metall følger da ved den generelle formelen:

Tonn metall = Tonn Manganskorpe x Gehalt

Disse er så summert opp for å få et representativt tall for hele utredningsområdet.

Beregningen av ressursene i utredningsområdet er gjort ved Monte Carlo-simulering med programmet @Risk. Denne simuleringen krever at tallverdiene for parameterne oppgis med spredning; minimum, forventningsverdi og maksimum. I kapittel 4.4 Letemodeller for manganskorper er parametervalg redegjort for og begrunnet. Videre er det beskrevet hvordan tallverdier er fastsatt for beregninger av ressurser i manganskorpene.

6.1.2.2 Resultater

Resultatene av beregningene av metaller i skorper er vist i de følgende tabeller.

I Tab. 6.2 er vist alle metaller som det er gjort ressursberegninger for. Tabellen viser forventede mengder (mean) samt P95- og P05-verdier. Fordelingen av skorperessurser på de fire regionale områdene (Fig. 4.28) er vist i Tab. 6.3. Totale mengder metaller per område er vist i kapittel 7.4 Ressurstabeller for letemodeller og delområder.

Tab. 6.2 Totale mengder metaller i manganskorper

Metall	P95	Forventning	P05
Mn (millioner tonn)	126	185	257
Ti (millioner tonn)	5,8	8,4	11,4
Mg (millioner tonn)	16,7	24,1	33,0
Li (tonn)	137 700	229 300	360 600
Sc (tonn)	36 400	55 800	79 500
V (tonn)	1 256 700	1 918 800	2 713 500
Co (tonn)	1 937 900	3 058 100	4 416 700
Nb (tonn)	48 000	73 000	103 200
Hf (tonn)	9 600	14 700	21 000
W (tonn)	46 100	80 300	131 200
Ga (tonn)	12 400	19 200	27 900
Y (tonn)	196 200	300 900	427 600
La (tonn)	241 500	368 800	521 700
Ce (tonn)	1 078 800	1 681 200	2 414 100
Pr (tonn)	67 100	102 500	145 900
Nd (tonn)	274 000	420 300	596 000
Eu (tonn)	15 100	23 200	32 900
Gd (tonn)	65 100	99 900	141 800

Tb (tonn)	9 900	15 200	21 600
Dy (tonn)	56 400	86 400	122 500

Tab. 6.3 Totale mengder manganskorper i millioner tonn, fordelt på delområde

Område	P95	Forventning	P05
V og Ø for Knipovitsjryggen	157	278	427
NV og SØ for Mohnsryggen	642	1 022	1 459
Jan Mayen-ryggen og sjøfjellene rundt	14	31	55
Vøringutstikkeren og Vøringplatået	44	120	235
Totalt	968	1 451	2 023

Se Fig. 4.28 for kart med markering av områdene.

6.1.3 Forventede totale ressurser

Forventningsverdier for samlede, tilstedeværende metaller i både sulfider og manganskorper i utredningsområdet, er vist i Fig. 6.8. Spredningen i utfallsrommet (P95 og P05) vises ikke i figuren.

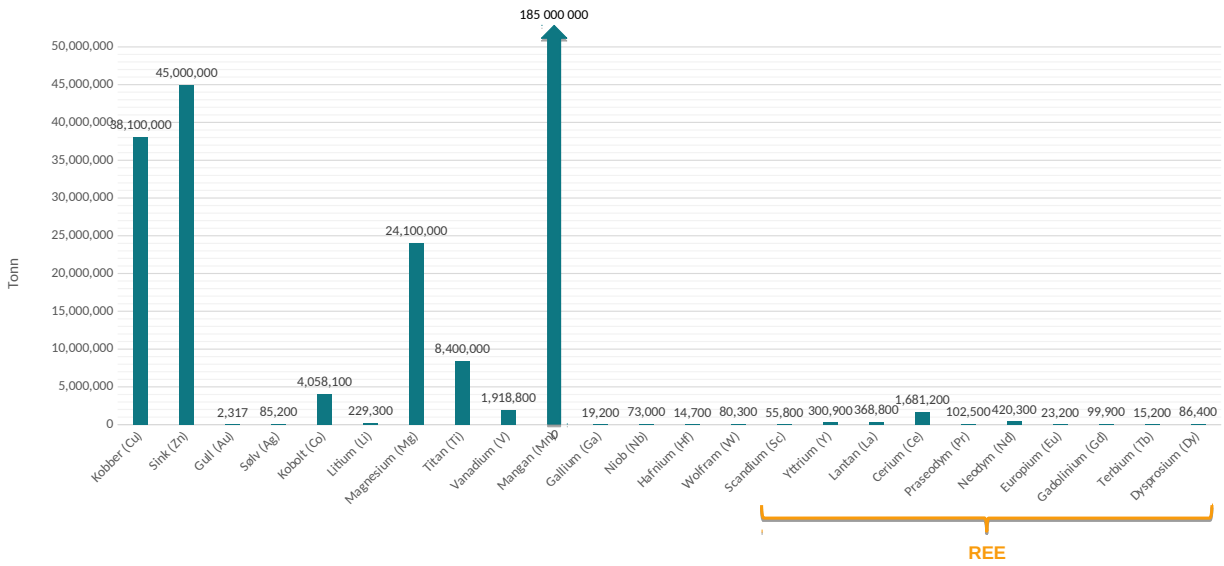

Fig. 6.8 Forventning tilstedeværende metallressurser

6.2 Ressurser i regneeksemplene Mohnsskatten og Sjøfjell

6.2.1 Mohnsskattens sulfidressurser

I dette avsnittet brukes Mohnsskatten, hvor vi har best datadekning, som eksempel på beregning av ressurser i en enkelt sulfidteig. Mohnsskatten består av to forekomster, A og B, og ligger på nordvestflanken av aksedalen i nordre del av Mohnsryggen. Det er beskrevet to geologiske modeller for Mohnsskatten. De geologiske modellene og tilhørende geologisk informasjon og nødvendige parametere er presentert i 4.2 Sulfideksempel Mohnsskatten med underkapitler. TAG-forekomsten som ligger på den midt-atlantiske ryggen sør for Azorene, brukes som modell for ressursberegningen slik den er beskrevet i seksjon 4.1.4 Geologisk ressursmodell. Beregningene regner først ut volumet av den massive sulfidkappen som ligger på havbunnen øverst i strukturen. Deretter legger man til volumet av den underliggende stockwerksonen beregnet med forholdstallet mellom sulfidkappen og stockwerket i TAG (=0,45). Siden disse beregningene dermed gjøres på grunnlag av overflatearealet i de to delene (A og B), vil det bli samme resultat for begge geologiske modeller.

Tonnasje malm i Mohnsskatten beregnes ut fra den generelle formelen:

(Volum[1] malm) x (Tetthet malm) = Tonn malm i letemodell

[1]Volumer beregnes ved hjelp av areal og tykkelse (dyp) av forekomstene.

Tonnasje av de enkelte metaller beregnes så ut fra gehaltene:

(Tonn malm) x (Gehalt av metall i % eller ppm) = Tonn metall

I det følgende oppgis de enkelte parametere for beregningen

Volum:

Overflatearealet = 68 705 m^2

Gjennomsnittstykkelse av massiv sulfid-kappe = 6 meter

Volum av stockwerk-sonen = (Volum av sulfid-kappen) x 0,45

Overflatearealet av sulfidkappen er digitalisert fra kartet over Mohnsskatten (Fig. 4.19). Tykkelsen er fastsatt i følge prinsipp beskrevet i avsnitt 4.1.5.1 Volum.

Tettheten:

Gjennomsnitt tetthet i den massive sulfidkappen = 3,8

Gjennomsnitt tetthet i stockwerk-sonen = 3,6

Metallgehalter:

Tab. 6.4 Gehaltstatistikk over utvalgte gehalter i Mohnsskatten

	Mohnsskatten 2020				
Metall	Gjennomsnitt	MEDIAN	STDV	Max	N
Cu %	0,91	0,48	1,92	14,30	65
Zn %	2,70	0,13	5,19	24,40	65
Co %	0,014	0,005	0,031	0,140	65
Au ppm	2,58	1,16	3,62	19,2	65
Ag ppm	64,5	8,25	123,5	548	65

Gehaltene som er brukt representerer gjennomsnittene av analyser av 65 prøver. Det benyttes samme gehalter for stockwerksonen som for sulfidkappen. De fem valgte metallene er de som ansees som mest økonomisk interessante.

Oppsummeringstabeller over parametere og beregninger:

Tab. 6.5 Dimensjoner og beregnet sulfid-tonnasje i Mohnsskatten

Mohnsskatten, soner	Areal m^2	Volum m^3	Tykkelse/ forholdstall	Tetthet	Ressurser, Mt
Sulfidkappe A	58720	352320	6	3,8	1,339
Sulfidkappe B	9985	59910	6	3,8	0,228
Sulfidkappe A + B	**68705**	**412230**			**1,566**
Stockwerksone A		158544	0,45	3,6	0,571
Stockwerksone B		26960	0,45	3,6	0,097
Stockwerk A + B		**185504**			**0,668**
Totalt	**68705**				**2,234**

Tab. 6.6 Gehalter og beregnede metall-tonnasjer i Mohnsskatten

Gehalt, gjennomsnitt	Cu %	Zn %	Co %	Au ppm	Ag ppm
Mohnskatten A + B	0,91	2,7	0,014	2,6	65
Tonnasje, metaller	Cu tonn	Zn tonn	Co tonn	Au tonn	Ag tonn
Sulfidkappe A	12183	36148	187	3	87
Sulfidkappe B	2072	6147	32	1	15
Sulfidkappe A + B	**14255**	**42295**	**219**	**4**	**102**
Stockwerk sone A	5194	15410	80	1	37
Stockwerk sone B	883	2620	14	0	6
Stockwerk A + B	**6077**	**18031**	**93**	**2**	**43**
Totalt	**20332**	**60326**	**313**	**6**	**145**

6.2.2 Sjøfjell manganskorperessurser

I dette avsnittet brukes sjøfjellet nordvest i Grønlandshavet og området rundt som regneeksempel på ressurser i et område med manganskorpe. Den geologiske modellen for forekomsten, og tilhørende geologisk informasjon og nødvendige parametere, er

presentert i 4.5 Manganskorpe-eksempel sjøfjell nordvest i Grønlandshavet. Regneeksempelet sjøfjell dekker et areal på 133 km2 hvor det er relativt god datadekning, gunstig topografi og tykke manganskorper.

Tonnasje manganskorpe i området beregnes ut fra den generelle formelen:

(Volum[1]) x (Tetthet tørre ressurser) = Tonn tørre ressurser

[1]Volumer beregnes ved hjelp av areal og tykkelse.

Tonnasje av de enkelte metaller beregnes så ut fra gehaltene:

(Tonn tørr manganskorpe) x (Gehalt av metall i % eller ppm) = Tonn metall

Nøkkelparametre fra ODs beregning er vist i Tab. 6.7 , der beregnet gjennomsnittsareal over 20 grader er 133 km^2 og forventet gjennomsnittstykkelse av manganskorpen er 28 cm.

Nærmere beskrivelse av arealberegning og tykkelsespredning er gitt i kapittel 4.4.1 Volum

Metallgehalter brukt er oppsummert i 7.3 Tabeller for gehalter i manganskorper

Tab. 6.7 Forventningsverdier for parametere for sjøfjell i Grønlandshavet

	Areal km^2	Volum millioner m^3	Tykkelse/ forholdstall (cm)	Tetthet	Ressurser millioner tonn
Sjøfjell NV i Grønlandshavet	133	43	28	1,3	56

Tab. 6.8 Beregnet tilstedeværende ressurser på sjøfjell i Grønlandshavet

Metall	P95	Forventning	P05
Mn (millioner tonn)	3,4	6,9	11,2
Ti (millioner tonn)	0,14	0,27	0,41
Mg (millioner tonn)	0,51	0,82	1,18
Li (tonn)	3 614	9 346	18 970
Sc (tonn)	1 224	2 368	3 708
V (tonn)	49 242	79 080	115 187
Co (tonn)	57 329	131 586	219 283
Nb (tonn)	1 518	2 913	4 591
Hf (tonn)	342	611	936
W (tonn)	1 228	3 414	7 198
Ga (tonn)	418	756	1 153
Y (tonn)	8 149	12 399	17 338
La (tonn)	7 829	14 475	22 300
Ce (tonn)	43 837	71 655	105 249
Pr (tonn)	2 337	4 067	6 086
Nd (tonn)	9 703	16 600	24 732
Eu (tonn)	579	926	1 339
Gd (tonn)	2 566	4 053	5 807

Tb (tonn)	392	614	881
Dy (tonn)	2 316	3 519	4 971

6.3 Kunnskapsbehov

Ressursvurderingen gir en første, samlet vurdering av havbunnsmineraler i utredningsområdet. Datagrunnlaget kan videre styrkes og metodikk for ressursmodellering videreutvikles. Teknologiutvikling, sammen med mer og bedre data, vil forbedre forståelsen av ressurspotensialet og dermed også kvantifiseringen av usikkerheten i ressursanslagene, og gi mulighet for å flytte ressurser til mer modne ressursklasser. Viktige bidrag for å øke treffsikkerhet i ressursanslagene er:

Innsamling av mer batymetri for bedre havbunnskart
53 pst. av utredningsområdet er per 01.12.2022 dekket av skipsbatymetri. Dette gir grunnlag for å utarbeide topografiske havbunnskart med god oppløsning (25 meter eller bedre). Det er behov for å dekke hele utredningsområdet i samme oppløsning. Dette er viktig for å kunne beregne areal av fjellområder som møter kriteriene for dannelse av manganskorper, og som grunnlag for AUV-tokt på leting etter eldre sulfidforekomster øst og vest for dagens spredningsrygger.

Leteboring på sulfidforekomster
For å redusere usikkerhet knyttet til tykkelse og utbredelse av sulfidforekomster i dypet, vil det være behov for grunne leteboringer. Seismiske metoder forventes også å kunne bidra til bedre forståelse av sulfidforekomstene i utredningsområdet og ressurser i dypet av disse, spesielt der disse kan kalibreres til grunne leteboringer.

Høyfrekvent seismikk for å avbilde sedimentpakker og paleo-sulfidforekomster
Store paleosulfid-ressurser vil være helt eller delvis begravd under sedimenter. Høyfrekvent seismikk og videreutviklede geofysiske metoder kan skille sedimenter og underliggende bergarter, samt sulfidforekomster fra basalter/vulkansk havbunn.

Tykkelsesmålinger for manganskorper på AUV
Det er behov for å utvikle teknologi som kan måle tykkelse på manganskorper raskt og effektivt. Det arbeides med å utvikle geofysiske verktøy som kan monteres på AUV'er og kontinuerlig samle inn denne type data.

Prøvetaking av manganskorper med ROV
I dag benyttes ROV med kutteverktøy (motorsag, vinkelsliper o.l) for å ta prøver. Dette er en tidkrevende teknikk, og mer effektive metoder må utvikles.

7 Appendiks

7.1 Andre sulfidforekomster kartlagt av Oljedirektoratet og akademia

I dette appendikset beskrives modeller for noen av de andre sulfidforekomster i utredningsområdet. Modellene bidrar til kunnskap og kalibrering av ressursvurderingen, men det er ikke gjort detaljerte ressursvurderinger for disse forekomstene.

7.1.1 Fåvne

Fåvne er en sulfid-teig som ligger nesten 140 km sør for Mohnsskatten på ca 72° 45’ N i skrenten på en av de store hovedforkastningene som utgjør nordvestflanken av aksedalen i nordlig del av Mohnsryggen. Gnitahei ligger i samme skrenten omtrent 700 meter sør for Fåvne (Fig. 7.1).

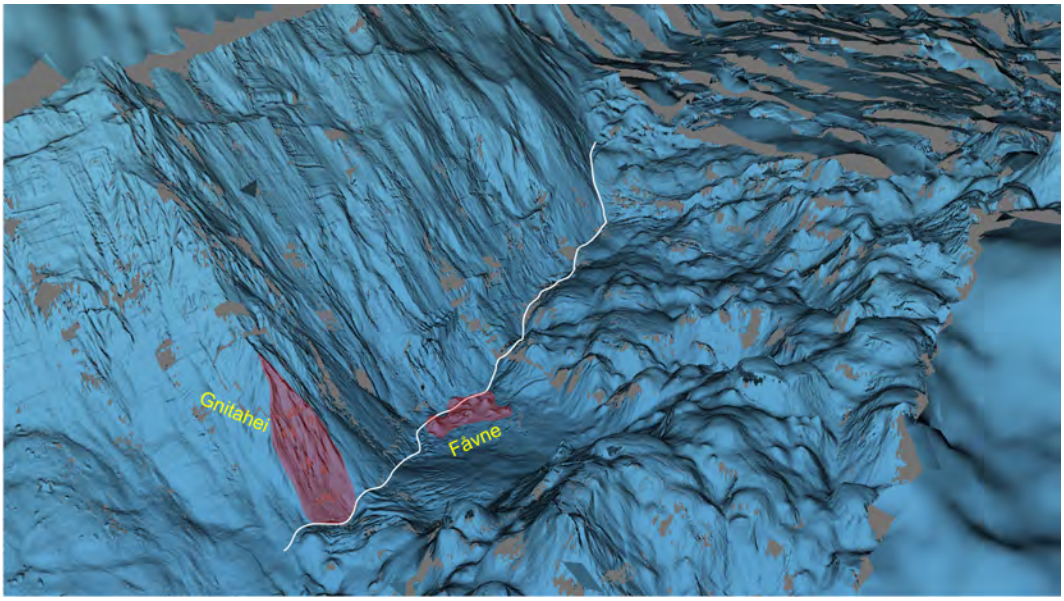

Fig. 7.1 Fåvne og Gnitahei sine beliggenheter
Perspektivkart som viser plasseringen av sulfidteigene Fåvne og Gnitahei sett fra sørøst. Sulfidteigenes utstrekning er antydet med gjennomsiktige polygoner. Den hvite linjen antyder foten av skråningen på hovedforkastningen på vestflanken av aksedalen.

7.1.1.1 Geologi og tektonisk ramme

Spranget på hovedforkastningen ved Fåvne er på ca 1000 meter, slik at dagens forkastningsskrent går fra eggen på ca 2 000 meters dyp til foten langs dalbunnen på 3 000 meter. Denne skrenten representerer overflaten av liggblokken av forkastningen. Forkastningen er fremdeles aktiv, og dagens spranghøyde vil fortsette å øke ved gjentatte episoder med større og mindre sprang gjennom forkastningens levetid.

Fåvne-teigen ligger ved foten av hovedforkastningen, delvis på tvers av overgangen mellom liggblokken og hengblokken (overgangen mellom skrenten og dalbunnen) (Fig. 7.2). Teigen består av syv store og flere små, separate sulfidkjegler innenfor et område på ca 250 x 130 meter, et område på 90 x 50 meter av dette ligger i liggblokken, mens resten ligger i hengblokken. To av de store kjeglene er bekreftet aktive, mens de øvrige må antas nylig å ha vært det eller være i en periode med redusert aktivitet. Dette fordi

skorsteinene er bygget av meget porøst og lite konsolidert materiale og er fortsatt helt intakte uten spor av erosjon. Dette viser at denne sulfidteige er meget ung der sulfidavsetningene ennå ikke er begynt å bli massive og konsoliderte.

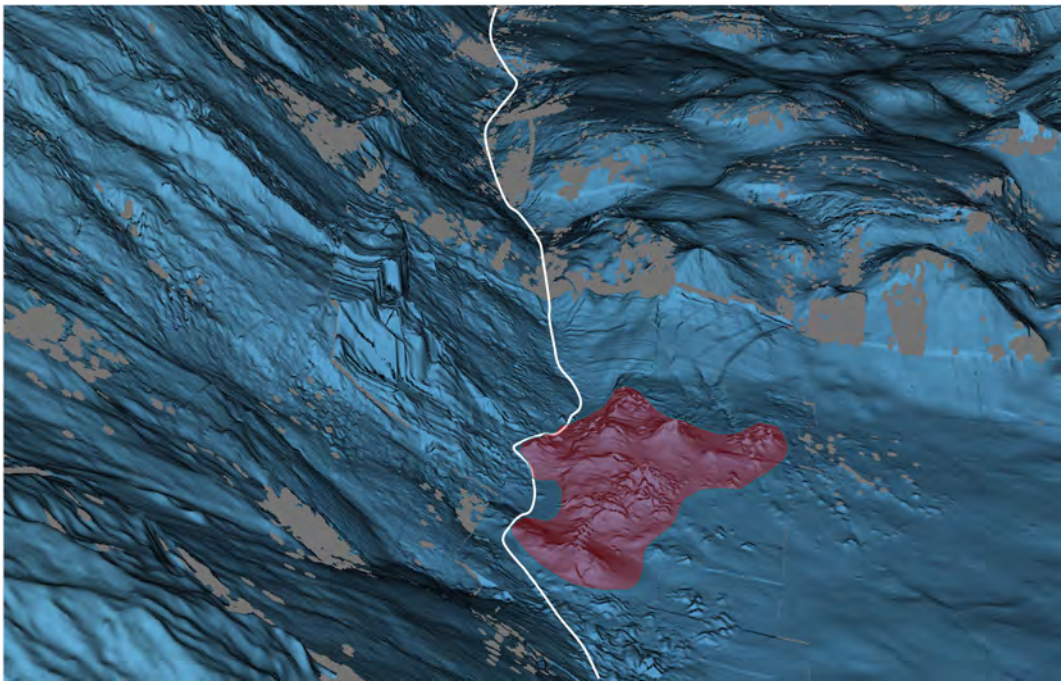

Fig. 7.2 Perspektivkart av Fåvne
Utstrekningen av sulfidteigen er antydet med et polygon i gjennomsiktig burgunder. Topografien internt i polygonet gjenspeiler sulfidteigens skorsteiner, kjegler og hauger.

Sulfidavsetningen i kjeglene er så løs at det ikke var mulig å bore ut kjerner. I stedet produserte boringen kun en løs masse av borekaks og støv som ble fanget opp i store plastsylindere. På en lokalitet lykkes man med å få ut en 2,2 m kjerne av den underliggende, sterkt breksjerte basalten. Breksjen i borekjernen har ennå ikke utviklet årer av utfelte mineraler slik at klastene ikke er kittet sammen, men ligger løst inntil hverandre. Men klastene har alle en mørk sone ytterst som viser at de var breksjert før den hydrotermale aktiviteten startet.

7.1.1.2 Geokjemi og undergrunnsmodell

Vulkankjeglene i Fåvne-teigen ligger adskilt med innbyrdes avstander på 20 til 50 meter. Som beskrevet ovenfor, er denne sulfidteigen ung, med kjegler og skorsteiner bygget av løst sulfidmateriale oppå en berggrunn av ikke-mineralisert basaltbreksje. Det betyr at i dagens sulfidteig stiger de hydrotermale væskene opp gjennom soner bestående stort sett kun av breksjerte sidebergarter. Dersom aktiviteten fortsetter, vil disse breksjene kunne utvikle seg til å bli en mineralisert stockwerksone. Man må da også vurdere om de enkelte kjeglene utvikles over separate tilførselsrør eller om de utvikler seg til å løpe sammen en felles stockwerksone.

Resultatene fra 15 analyser fra Oljedirektoratet, 12 fra Sahlström et al. (2020) og 8 fra UiB gir til sammen et gjennomsnitt på 3,55 pst. Cu, 7,20 pst. Zn og 0,32 pst Co for Fåvne. De gjennomgående høye verdiene for Co (0,1 til 0,98 pst.) tyder på at de hydrotermale væskene har vært i kontakt med ultramafiske bergarter i undergrunnen. Det er ikke påvist slike bergarter internt eller i nærheten av Fåvne-teigen, hverken i hengblokken eller liggblokken. Men det må regnes som sannsynlig at ultramafiske bergarter er brakt

så høyt i skorpen langs forkastningsplanet i liggblokken at de er blitt en del av det hydrotermale systemet. Som for Mohnsskatten er den tredimensjonal TAG-modellen benyttet for å predikere en mulig, realistisk, tredimensjonal modell for Fåvne (se snitt i Fig. 7.3). Dimensjonene i modellen er tatt fra TAG-modellen kombinert med kartbildet i overflaten. Denne modellen gir grunnlag for beregning av ressurser i Fåvne. Dette vil også gi grunnlag for å predikere hvor store ressursene i Fåvne vil bli i fremtiden dersom den utvikler seg med en sonering (vertikalt og horisontalt) som i TAG og Mohnsskatten.

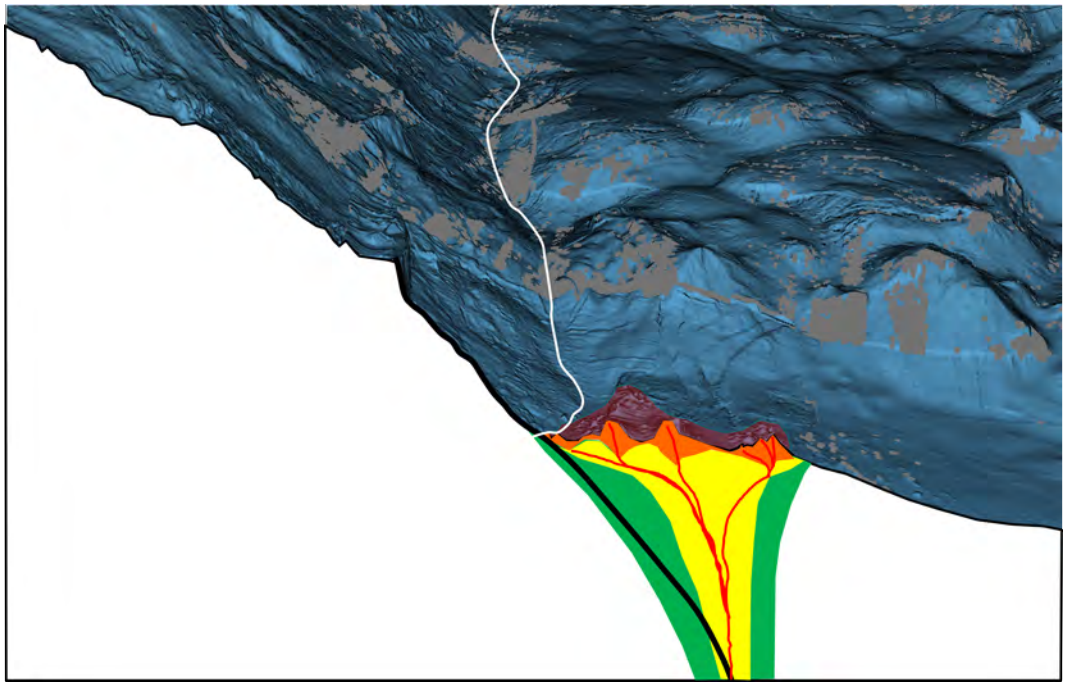

Fig. 7.3 Fåvne modellsnitt
Et snitt av jordskorpen på tvers av Fåvneteigen kombinert med havbunnstopografien sett i perspektiv fra sørøst. Utstrekningen av sulfidteigen bak snittet er antydet som burgunder polygon. De massive sulfidene og sulfidbreksjene er antydet i mørk orange, stockwerksonen med mineralisering og bergartsbreksjer er antydet i gult med mineraliserte årer skjematisk antydet i rødt, og sonen med hydrotermalt påvirket sidebergart er antydet i lyst grønn. Hovedforkastningsplanet er vist som svart linje.

7.1.2 Gnitahei

Gnitahei er en sulfid-teig som ligger nesten 140 km sør for Mohnsskatten på ca 72° 45’ N i skrenten på en av de store hovedforkastningene som utgjør nordvestflanken av aksedalen i nordlig del av Mohnsryggen. Fåvne ligger i samme skrenten omtrent 700 meter nord for Gnitahei (Fig. 7.1).

7.1.2.1 Geologi og tektonisk ramme

Spranget på hovedforkastningen her er på ca 1 000 meter, slik at dagens forkastningsskrent går fra eggen på ca 2 000 meters dyp til foten langs dalbunnen på 3 000 meter. Denne skrenten representerer overflaten av liggblokken av forkastningen. Forkastningen er fremdeles aktiv, og dagens spranghøyde vil fortsette å øke ved gjentatte episoder med større og mindre sprang gjennom forkastningens levetid.

Gnitahei ligger i en lokal skredgrop oppe i forkastningsskrenten på liggblokken. Denne skredgropen strekker seg fra 2 775 meters dyp og ender mot dalbunnen ved foten av forkastningsskrenten. Den har en trekantet form, med en bredde på ca 200 meter ved foten og smalner til en spiss mot toppen. Sulfidteigen strekker seg fra den øvre kanten

på skredgropa på 2 775 meters dyp helt ned til foten (Fig. 7.1). Utover på dalbunnen nedenfor skredgropen ligger en stor vifte som sannsynligvis inneholder massene fra skredet.

I skredgropen i dag er det bare stockwerksonen av den opprinnelige Gnitaheiforekomsten som er blottet i forkastningsskrenten. De øvre delene med de massive sulfidavsetningene og deres skorsteiner, kjegler og hauger er fjernet ved utrasningen(e) som dannet skredgropen. Det er ikke funnet noen skorsteiner, kjegler eller hauger, hverken nede i skredgropen eller langs kantene, unntatt noen få skorsteinsfragmenter litt ovenfor raskanten (Wold, 2022). Det betyr at utrasningen(e) skjedde etter at den hydrotermale aktiviteten døde ut. At det nesten ikke er spor etter de typiske sulfidstrukturene utenfor skredgropen heller, tyder på at denne sulfidteigen er gammel og fullstendig nederodert.

7.1.2.2 Geokjemi og undergrunnsmodell

ROV-videoene og prøvetaking viser at mye av skredgropen består av breksjert sidebergart og utrast materiale av samme. Opp av disse massene stikker det en del langstrakte, smale rygger med sammenkittede breksjer. Disse representer antagelig rester av store, mineraliserte årer som har vært transportveier for hydrotermale væsker. I disse og spredt langs skredkantene er det funnet prøver av massivt sulfid og basaltbreksjer med mineralisert matriks. Oljedirektoratet har gjort analyser av 16 sulfidprøver fra Gnitahei. De inneholder vesentlig Fe og viser svært lave verdier av både Cu og Zn, henholdsvis 0,15 og 0,2 pst. En ekstra analyse tatt med håndholdt XRF viser 2,5 pst. Zn, som er den høyeste verdi som er registret til nå. UiB rapporterer også lave verdier; et snitt på 0,5 pst. Cu i de massive sulfidene (Wold, 2022). Oljedirektoratets prøver inneholder markert mindre Co i Gnitahei (ca 0,04 pst) enn i Fåvne, men representerer likevel en anrikning i Co. Studier av Wold (2022) viser til det samme nivået for Co og at dette, sammen med et forhøyet Ni-nivå tyder på at det hydrotermale systemet knyttet til Gnitahei kan ha vært i noekontakt med ultramafiske vertsbergarter slik tilfellet synes å være også med Fåvne-teigen.

Avgrensingen av Gnitahei-teigen er ikke helt avklart – til det trengs det mer prøvetaking. Imidlertid ser det ikke ut til at den strekker seg mye utover den lokale skredgropen. Det er også sannsynlig at en stor del, kanskje mesteparten av sufidressursene ligger i skredviften i dalbunnen nedenfor.

Det er to mulige modeller for strukturen av Gnitahei-teigen i undergrunnen. I den ene (Modell 1) antas det at sulfidteigen har utviklet seg ved foten av skåningen i samme tektoniske posisjon som Fåvne-teigen i dag, og at de hydrotermale væskene har fulgt hovedforkastningssonen. Etter at sulfidteigen er blitt inaktiv, er den delen som ble utviklet i hengblokken blitt hevet til dagens plassering i skråningen, der dagens skredgrop er dannet ved seinere utrasninger (Fig. 7.4). I den andre modellen (Modell 2) antas det at hele Gnitahei-teigen ble utviklet i selve hengblokken med en hydrotermal breksjesone vertikalt under forekomsten. Etter at den ble inaktiv har så store deler rast ut og etterlatt seg skredgropen (Fig. 7.5).

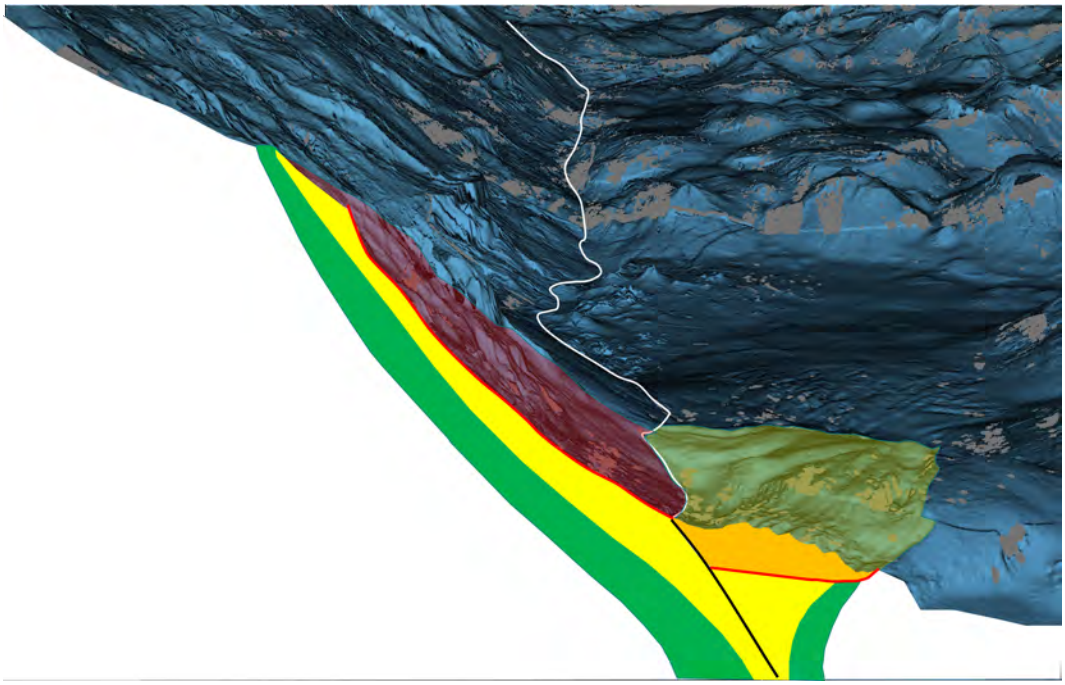

Fig. 7.4 Gnitahei modell 1
Et snitt av jordskorpen på tvers av Gnitahei-teigen kombinert med havbunnstopografien sett i perspektiv fra sørøst. Utstrekningen av sulfidteigen og skredgropa bak snittet er antydet som burgunder polygon. Stockwerksonen med mineralisering og bergartsbreksjer er antydet i gult, og sonen med hydrotermalt påvirket sidebergart er antydet i lyst grønn. Skredviften nedenfor skredgropen er vist med gjennomsiktig, gul overflate og oransje snitt. Skredets glideplan er vist i rødt. Hovedforkastningsplanet er vist som svart linje.

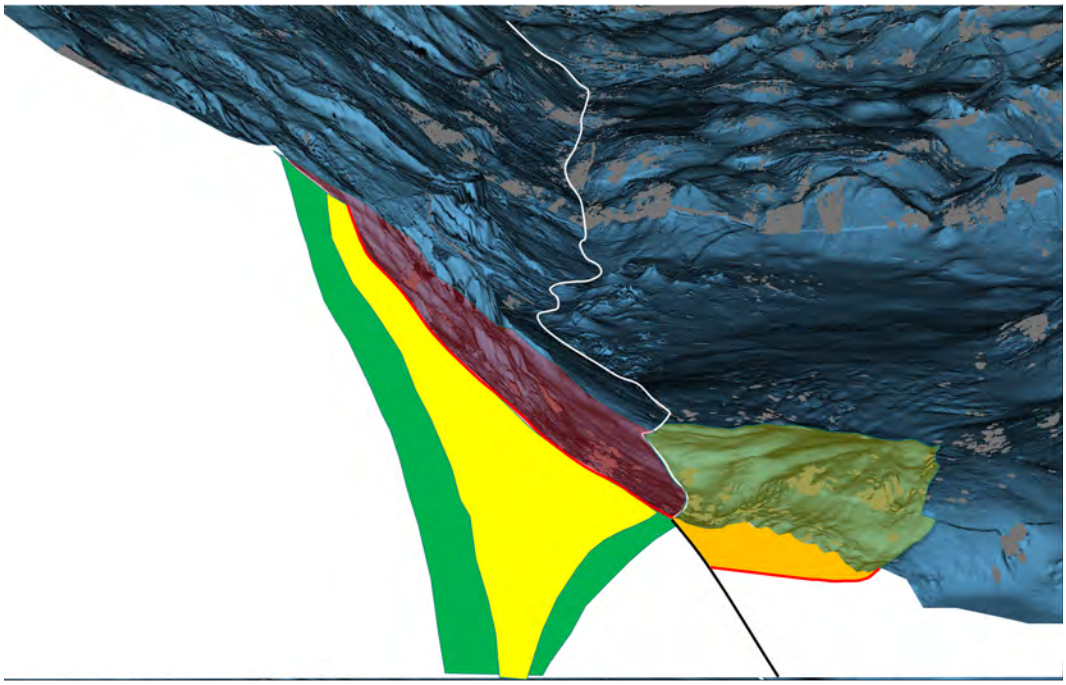

Fig. 7.5 Gnitahei modell 2
Et snitt av jordskorpen på tvers av Gnitahei-teigen kombinert med havbunnstopografien sett i perspektiv fra sørøst. Utstrekningen av sulfidteigen og skredgropa bak snittet er antydet som burgunder polygon. De massive sulfidene og sulfidbreksjene er antydet i mørk oransje, stockwerksonen med mineralisering og bergartsbreksjer er antydet i gult, og sonen med hydrotermalt påvirket sidebergart er antydet i lyst grønn. Skredviften nedenfor skredgropen er vist med gjennomsiktig, gul overflate og oransje snitt. Skredets glideplan er vist i rødt. Hovedforkastningsplanet er vist som svart linje.

7.1.3 Lokeslottet

Lokeslottet er en sulfid-teig som ligger 32 km nord for Mohnsskatten på ca 73° 33’ N på en aksial vulkanrygg der aksedalen i Mohnsryggen begynner å svinge inn i aksedalen i Knipovitsjryggen (Fig. 2.1).

7.1.3.1 Geologi og tektonisk ramme

Lokeslottet er en sulfidteig som består av to store, sammengrodde, kjegleformede sulfidhauger med aktive skorsteiner på toppen. De to haugene er ca 30 meter høye og ligger innenfor et område på ca 250 x 150 meter. Den aksiale vulkanryggen de ligger på, består av basaltisk lava (Fig. 7.6).

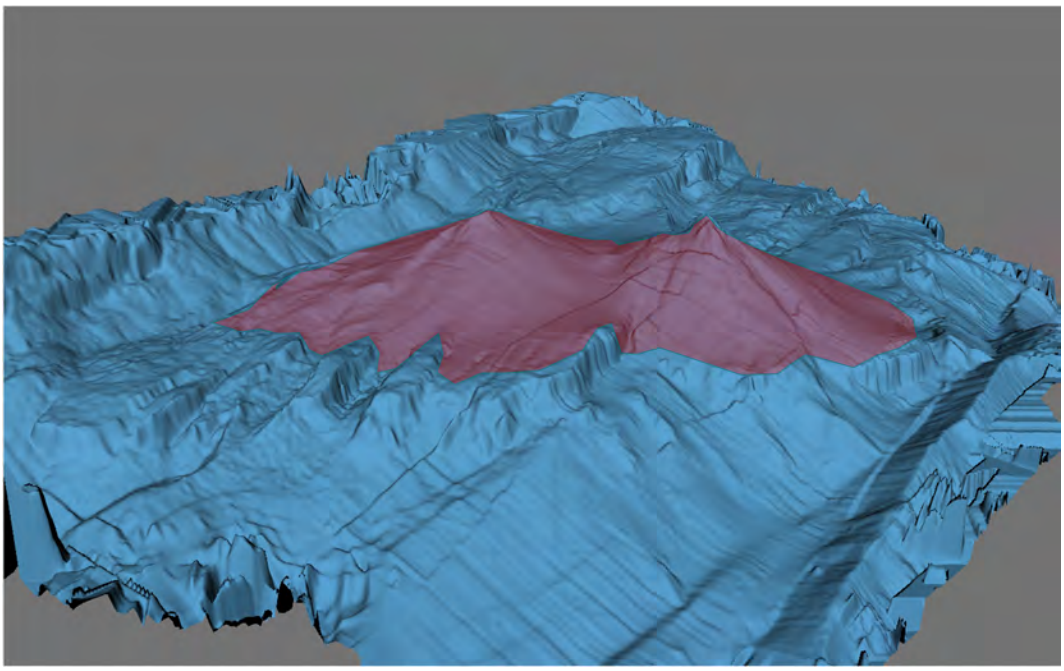

Fig. 7.6 Lokeslottet
Perspektivkart av sulfidforekomsten Lokeslottet med sine to sulfidhauger og sentrale skorsteiner, sett fra sørøst. Utstrekningen av forekomsten er antydet med et polygon i gjennomsiktig burgunder.

7.1.3.2 Geokjemi og undergrunnsmodell

De aktive skorsteinene viser at vulkanryggen har sprekkesoner som når ned i den hydrotermale reaksjonssonen i undergrunnen. På batymetrien ser det ut til at disse sprekkesonene ligger i et sett med forkastninger som stryker langsetter den vulkanske ryggen, både sentralt på ryggen og langs flankene. Den regulære kjegleformen og høyden på de to haugene viser at det er to tilførselssoner til overflaten og at disse har vært stabile over tid. Det foreligger da to mulige undrgrunnsmodeller for de to sulfidhaugene. De kan være tilknyttet reaksjonssonen i dypet ved en felles sprekkesone som fordeles på to tilførselrør langs hvert sitt forkastningsplan opp mot overflaten (Modell 1) (Fig. 7.7), eller de to haugene kan ha separate tilførselsrør helt ned til reaksjonssonen i dypet (Modell 2) (Fig. 7.8).

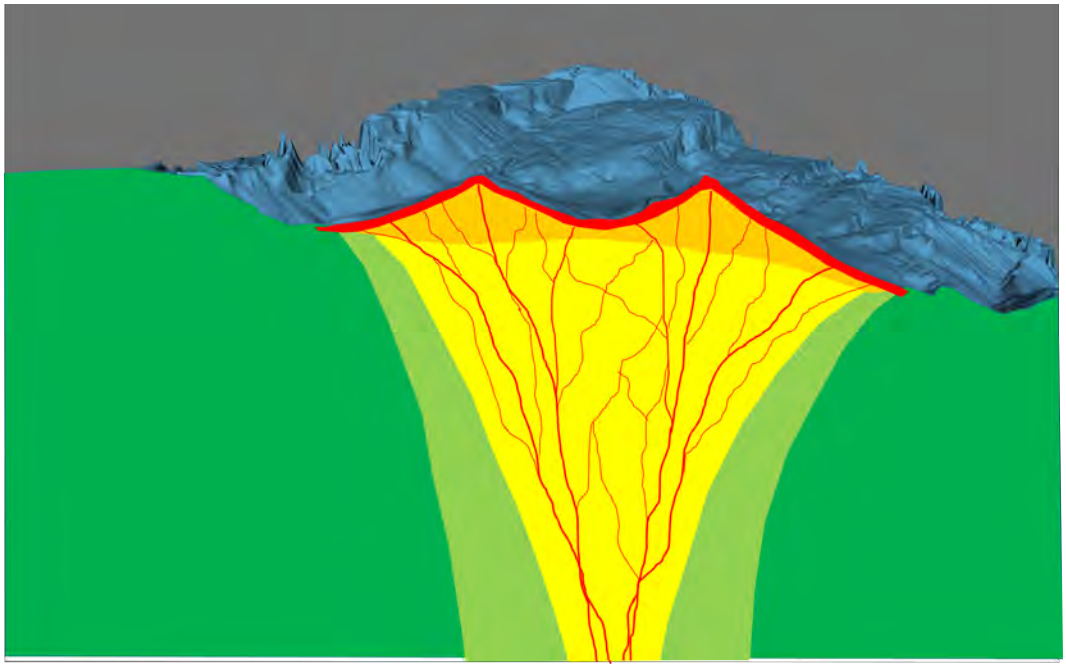

Fig. 7.7 Lokeslottet Modell 1
Et snitt av jordskorpen på tvers av Lokeslottet kombinert med havbunnstopografien sett i perspektiv fra sørøst. Et «topplokk» av massiv sulfid er antydet i rødt, de massive sulfidene og sulfidbreksjene er antydet i mørk oransje, stockwerksonen med mineralisering og bergartsbreksjer er antydet i gult med mineraliserte årer skjematisk antydet i rødt, sonen med hydrotermalt påvirket sidebergart er antydet i lyst grønn, og sidebergarten er antydet i mørkt grønn.

Fig. 7.8

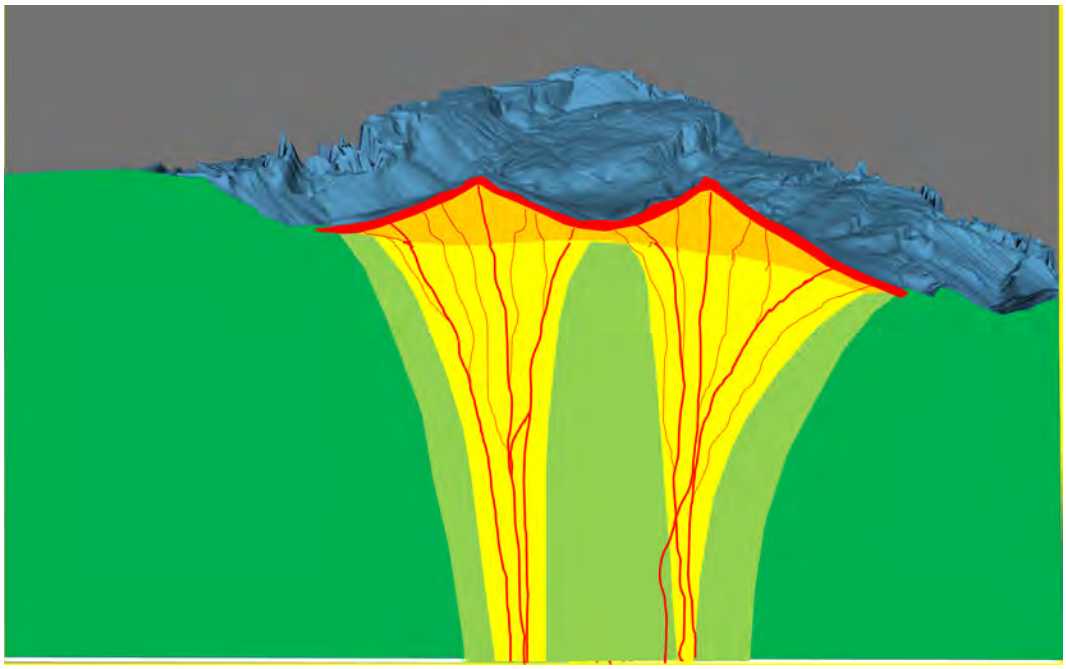

Fig. 7.8 Lokeslottet Modell 2
Modell 2 for Lokeslottet. Her har de to sulfidhaugene i overflaten adskilte tilførselsrør og stockwerksoner. Snittet og fargekodene er de samme som i Fig. 7.7

Resultatene fra 46 analyser fra UiB, 7 fra Snook et al. (2018) og 7 fra Sahlström et al. (2020) gir til sammen et gjennomsnitt på 0,96 pst. Cu, 1,52 pst. Zn for Lokeslottet. Dette er noe lavere konsentrasjoner enn for Mohnsskatten, og betydelig lavere enn for Fåvne.

Lokeslottet har svært lav konsentrasjon av Co. De generelt lave metallkonsentrasjonene i Lokeslottet skyldes antagelig innblanding av sedimenter i systemet som beskrevet tidligere (4.1.3 Geokjemi og metallgehalt).

7.2 Tabeller for kaledonske sulfidforekomster

Tab. 7.1 Hydrotermale sulfidforekomster i skandinavisk del av den kaledonske fjellkjeden; mulige SMS-analoger

Navn, forekomst	Sone	Produsert Mt	Opprinnelig Mt	Cu%	Zn%	Au ppm	Ag ppm	Co%	Pb%	Hovedmalm	Verts-bergart	Type	Gruppe
Gravdal	Hardanger	0,141	0,141	1,35	0,7					Cu	Rhyd	VMS	A
Grev Moltke Gruve	Folldal-Meråk.	0,3	0,3	2	5	0,35	48		0,45	Cu, Zn, Ag	Dac, tuff	VMS	A
Søndre Geitryggen	Folldal-Meråk.	0,5	0,5	0,7	2,7	0,35	27		0,15	Cu, Zn, Au, Ag	Dac, tuff	VMS	A
Stekenj. enjokk	Grong-Stekenj.	6,97	11,93	1,29	3,81	0,4	53,1		0,59	Cu, Zn, Au	Tuff, Qzp	ExVo	A
Levimalmen	Grong-Stekenj.	0	5,14	1,25	1,84		24,21		0,14	Cu, Zn, Ag	Qzp	ExVo	A
Tjokkola	Grong-Stekenj.	0	0,17	0,89	2,2	0,1	22		0,1	Cu, Zn, Ag	Tuff, Qzk	ExVo	A
Beitsetjenjunje	Grong-Stekenj.	0	0,2	0,85	1,06	0,19	13		0,16	Cu, Zn	Qzk	ExVo	A
Raudvatnet		0	0,365	0,49	2,5	0,4	39			Zn, Cu, Ag, Au	Fels	VMS	A
Hamarfjell Østre					4,3	0,12			1,5	Zn, Pb, Cu	Andprf	VMS	A
Skorovas	Grong-Stekenj.	5,6	6,9	1,14	2,71					Cu, Zn	Grstn, And, Fels	VMS	MA
Visletten	Grong-Stekenj.	0	0,78	0,92	3,86	0,5				Zn, Cu	Grstn, Fels	VMS	MA
Gjersvik	Grong-Stekenj.	0,45	1,6	2,15	0,6					Cu, Zn	Grstn, And, Fels	VMS	MA
Bjørkvatnet	Grong-Stekenj.	0	0,08	0,85	0,35	0,13	3,9		0,04	Cu, Zn	Grsk, tuff	ExVo	MA
Anna	Sulitjelma	0,29	0,29	3,86						Cu, Zn	Amf	VMS	MV
Nygruva	Hardanger	0,006	0,049	0,7	3,4	0,8			0,05	Zn, Cu, Au	Grstn	VMS	MV
Valaheien	Hardanger	0,17	0,484	0,27	0,1					Cu, Zn	Grstn	VMS	MV
Nedre rustgruva	Sel	Lite	Liten							Cu	Grstn	VMS	MV
Åsåren	Sel		0,73	1,43	1,32			0,07		Cu, Co, Zn	Grstn	VMS	MV
Grimeli	Sunnfjord	0,05	1,5	2	1					Cu	Grstn	VMS	MV
Svanøy	Sunnfjord	0,039	0,102	1,75						Cu, Zn	Grstn	VMS	MV
Gammelgruva	Folldal-Meråk.	1,15	3	1,9	1,1					Cu, Zn	Amf, Trd	VMS	MV
Fredrik IV	Folldal-Meråk.	0,003	0,003	6		1,7		0,1		Cu	Gabbro	ÅreCu*	MV

Hersjøgruva	Folldal-Meråk.	0,004	2,99	1,7	1,4	0,1	4			Cu, Zn	Grstn	VMS	MV
RødhamMeråk.	Folldal-Meråk.	0	0,9	0,5						Cu, Zn	Dol, Amf	VMS	MV
Gressli	Folldal-Meråk.	0,005	0,085	0,9	5,5					Cu, Zn	Grstn, Dac	VMS	MV
Heimtjønnhø	Støren-Løkken	0	1,6	0,01	0,04					Cu, Zn	Maf	VMS	MV
Tverrfjellet	Støren-Løkken	15	19	1	1,2	0,08	10		0,2	Cu, Zn	Maf	VMS	MV
Oscar II	Røros-Tydal	0,0096	0,0096	3,5						Cu	Maf	VMS	MV
Løkken	Støren-Løkken	24	30	2,3	1,8	0,2	16	0,07	0,02	Cu, Zn, Fe, Co	Grstn, jaspis	VMS	MV
Høydal	Støren-Løkken	0,1	1,159	1,15	0,45	0,27	36		0,08	Cu, Ag	Grstn	VMS	MV
Åmot	Støren-Løkken	0,012	0,012	3						Cu	Grstn	VMS*	MV
Dragset	Støren-Løkken	0,065	0,1	3,5							Grstn	VMS	MV
Ytterøya	Støren-Løkken	0,46	0,46	1,9	2,4				0,3	Cu, Zn	Grstn	VMS	MV
Ulriksdal	Støren-Løkken	0,0042	0,0042	0,8	1,5					Cu, Zn	Grstn	VMS	MV
Åkervoll	Støren-Løkken	0,025	0,025	1,5	20	0,1	100		1,75	Cu, Zn, Ag	Grstn, Dac	VMS	MV
Malså	Støren-Løkken	0,001	0,5	4,9	0,2					Cu	Grstn, Dac	VMS	MV
Killingdal	Røros-Tydal	2,959	3,242	1,7	5,5				0,4	Zn, Cu	Grstn, Plava	VMS	MV
Joma	Grong-Stekenj.	11,453	18,653	1	1,66					Cu, Zn	Grstn	VMS	MV
Remdalen	Grong-Stekenj.	0	0,38	1,66	2,66					Cu, Zn	Grstn	ExVo	MV
Jakobsbakken	Sulitjelma	4,47	4,5	1,55	2,42					Cu, Zn	Amf	SedExhal	MV
Fjelds	Sulitjelma	0	0,25	1,5						Cu, Zn	Amf	VMS	MV
Mons Petter	Sulitjelma	2,5	2,5	1,75	0,48					Cu, Zn	Amf	VMS	MV
Rieppe	Vaddas-Birtav.	0	3	0,5	2					Zn, Cu	Grstn	VMS	MV
Øvre Nomilolgi	Vaddas-Birtav.	0	0,15	0,88	1			0,06		Cu, Co, Zn	Grstn	VMS	MV
Loftani	Vaddas-Birtav.	0	0,22	1,2	0,1			0,05		Cu, Co	Grstn	VMS	MV
Vaddas	Vaddas-Birtav.	0,7	1,415	1,37	0,01			0,05		Cu, Co	Grstn	VMS	MV
Grimsdalen	Folldal-Meråk.	Lite	14,3	0,5	2,3					Cu, Zn	Fyl, Trd	VMS	SA
Nordre Geitryggen	Folldal-Meråk.	2,5	2,5	1,3	3,2	0,2	31		0,2	Cu, Zn	Fyl, Prf	VMS	SA
Mannfjell	Folldal-Meråk.	0,1	0,1	1,8	5,3	1				Cu, Zn, Au	Ssk, Prf, Grstn	VMS	SA

Heramb	Rana-Hemnes			3	3		45		0,2	Cu, Zn	Glgn, Rhyd	VMS	SA
Mos gruve	Rana-Hemnes	0,052	0,122	0,5	1,1					Zn, Cu	Glgn, Rhyd	VMS	SA
Sølvberget	Rana-Hemnes	0,005	5	0,4	1,6		2,5		0,05	Zn, Cu	Glgn, Rhyd	VMS	SA
Mos gruve	Rana-Hemnes	0,052	0,122	0,5	1,10					Zn, Cu	Glgn, Rhyd	VMS	SA
Hesjelia	Rana-Hemnes			0,6	3,7		11		0,3	Zn, Cu	Glgn, Rhyd	VMS	SA
Malmberg	Rana-Hemnes	0,006	0,5		0,35					Zn	Rhyl, Glsk	VMS	SA
St. Knut	Tron	0,0008	0,0008	8						Cu	Grv	ÅreCu*	SD
Sivilvangen	Folldal-Meråk.	0	0,4	0,7	4,3					Cu, Zn	Fyl, Gffyl	VMS	SD
Vinglen	Folldal-Meråk.	0,03	0,23	1,3	3,8					Cu, Zn	Fyl	VMS	SD
Fosgruva	Folldal-Meråk.	0,017	0,064	1,3	1,1					Cu	Glsk	VMS	SD
Storvollen	Folldal-Meråk.	0,0085	0,0085	2						Cu	Glsk	VMS	SD
Storwartz	Røros-Tydal	1,62	1,7	1,8	12,1	0,33	25,3		0,9	Zn, Cu	Klkfyl	VMS	SD
Quintus	Røros-Tydal	0,75	0,75	0,9	???					Cu, Zn	Klkfyl	VMS	SD
Olavsgruva	Røros-Tydal	1,131	1,3	1,39	1,44					Cu, Zn	Klkfyl	VMS	SD
Nyberget	Røros-Tydal	0,12	0,12	4						Cu	Klkfyl	VMS	SD
Gamle Solskinn	Røros-Tydal	0,09	0,09	3						Cu	Klkfyl	VMS	SD
Svenskemenna	Røros-Tydal	0,0012	0,0012	1,37	1,8					Cu, Zn	Qzglsk	VMS	SD
Kjøli I	Røros-Tydal	0,25	0,25	2,1	0,1					Cu	Leistein, Grv	VMS	SD
Grøbskard	Røros-Tydal			2,5						Cu	Qzglsk	VMS	SD
Allergot	Røros-Tydal			3	2,4					Cu, Zn	Qzglsk	VMS	SD
Lillefjell	Røros-Tydal	0,107	0,107	5	4,5					Cu, Zn	Grv	VMS	SD
Kviknegruvene	Kvikne-Singsås	0,25	0,25	2,36	1,81		11			Cu, Zn	Qzglsk	VMS	SD
Fløttum	Kvikne-Singsås		0,35	0,96	4,76		29			Zn, Cu	Qzt, Fyl	VMS	SD
Undal	Kvikne-Singsås	0,279	1	1,15	1,86					Cu, Fe, Zn	Melange	VMS	SD
Jormlien	Grong-Stekenj.	0,00002	0,612	0,4	4,75					Mn, Fe, Zn	Grv	ExVo	SD
Ankaravattnet	Grong-Stekenj.	0	0,75	0,45	5,48	0,2	17		0,37	Zn Cu	Grv	ExVo	SD

Unna Gaisartjåkko	Grong-Stekenj.	0	1	0,8	0,5	0,5	20			Cu, Au, Zn, Ag	Grv	ExVo	SD
Daningen	Grong-Stekenj.	0	0,05	9,85	0,6	0,6	12		0	Cu	Grv	ExVo	SD
Abelvattnet	Grong-Stekenj.	0	0,069	0,9	0,07					Cu	Grv	ExVo	SD
Storäcksdalen Västra	Grong-Stekenj.	0	0,015	1,2	6,3	0,5	49		2,4	Zn, Cu, Pb, Ag	Fyl, Srsk	ExVo	SD
Rikarsbäcken	Grong-Stekenj.	0	0,15	0,8	4,3	0,2	43		1,1	Zn, Cu, Ag, Pb	Fyl, Srsk	ExVo	SD
Tjåter	Grong-Stekenj.	0	0,15	1	4,8	0,5	49		1,9	Zn, Cu, Pb, Ag	Srsk, Svsk	ExVo	SD
Bleikvassli	Rana-Hemnes	5,84	8,84	0,15	4		25		2	Zn, Pb	Grtglsk	VMS	SD
Gräskevardo	Rana-Hemnes	0	0,1	0,35	3,49		34		1,23	Zn, Pb, Cu, Ag	Glsk	ExVo	SD
Hellerfjellet	Rana-Hemnes			0,5	10		110		3	Zn, Pb, Ag	Gfglsk	VMS	SD
Båsmo	Rana-Hemnes	1,85	1,85	0,13	0,14					Cu, Zn	Grtklsk	SedExhal	SD
Ingeborgvatn	Sulitjelma	0	0,5	1,5	1		15			Cu, Zn	Klsed	VMS	SD
Ny-Sulitjelma	Sulitjelma	2,59	2,59	1,99	0,55	0,3		0,01		Cu	Glsk	VMS	SD
Hankabakken	Sulitjelma	1,99	2,49	1,4	0,4					Cu, Zn	Glsk	VMS	SD
Bursi	Sulitjelma	1,83	1,845	1,5	0,31					Cu	Glsk	VMS	SD
Sabetok	Vaddas-Birtav.	0,014	0,35	1,2						Cu	Grv	VMS	SD
Moskodal	Vaddas-Birtav.	0,04	0,225	2,67						Cu, Zn	Grv	VMS	SD
Litlabø	Hardanger	9	9		0,28					Zn, S	Fyl, Grstn	VMS	SD
Christianus Sextus	Røros-Tydal	0,25	0,25	2,38	7,36	0,14	14,4		0,44	Zn, Cu	Grv, tuff	VMS	SV
Lergruvbakken	Røros-Tydal	0,45	0,97	1	9,4		20		0,4	Zn, Cu	Grv, tuff	VMS	SV
Kongens Gruve	Røros-Tydal	1,5	3	2,2	6,9	0,17	31,3		0,5	Zn, Cu	Grv, tuff	VMS	SV
Fjellsjø	Røros-Tydal		1,75							Zn, Cu	Grv, tuff	VMS	SV
Kvernenglia	Røros-Tydal		0,142	0,3	1,98					Zn, Cu	Grv, tuff	VMS	SV
Muggruva	Røros-Tydal	0,65	0,65	2	0,3	0,34	12,7			Cu	Grv, tuff	VMS	SV
Skrattåsen		0,005	0,085	1	7		70		2	Zn, Cu, Pb, Ag	Tuff, Glsk	VMS	SV
Godejord	Grong-Stekenj.	0	0,25	0,6	4,2	0,4	15		0,2	Zn, Cu	Tuff, Kalk, Kst	VMS	SV
Skiftesmyr	Grong-Stekenj.	0	4,07	1	1,5	0,1	2,5			Cu, Zn	Tuff, Kst	VMS	SV
Finnbu	Grong-Stekenj.	0	0,25	0,3	3					Zn, Cu	Tuff, Kst	VMS	SV

Mofjellet	Rana-Hemnes	4,35	5,35	0,31	3,61	0,3	10		0,71	Zn, Cu	Grv, Vlk	SedExhal	SV
Rødalen	Kvikne-Singsås	0,04	0,04	1,13	0,2	0,3				Cu	Qzt, Amf, Glsk	VMS	MS
Røstvangen	Kvikne-Singsås	0,388	0,488	3,09	0,73	0,28	12	0,05		Cu, Co	Msst, Amf	VMS	MS
Børsjøhø	Kvikne-Singsås	0,0008	2,0008	1,21	0,92					Cu, Zn	Msd, Amf	VMS	MS
Småvatnan	Rana-Hemnes			0,6	10		140		1,9	Zn, Pb, Ag	Glgn, Amf	VMS	MS
Gudrun	Sulitjelma	0,71	0,71	1,49	0,55					Cu, Zn	Amf, Glsk	VMS	MS
Giken	Sulitjelma	5,8	10,5	2,25	0,7					Cu, Zn	Glsk, Amf	VMS	MS
Charlotte	Sulitjelma	3	3,1	2	0,58	0,24		0,02		Cu, Co, Zn	Glsk, Amf	VMS	MS
Furuhaugen	Sulitjelma	0,37	0,52	1,65						Cu, Zn	Amf, Glsk	VMS	MS
Rupsi	Sulitjelma	0	4,2	1,1						Cu, Zn	Msst, Amf	VMS	MS
Bjørkåsen	Troms Fe	6	6	0,45	1					Cu, Zn	Grtglsk, Amf	VMS	MS
Moskogaissa	Vaddas-Birtav.	0,065	0,065	4,5						Cu	Grstn, Grv	VMS	MS
Birtav. avarre	Vaddas-Birtav.	0,2	0,2	4,4							Glsk, Grstn	VMS	MS
Vigsnes	Karmøy	1,44	1,44	1,66	1,4					Cu, Zn	Fyl, Grstn	VMS	MS
Rødkleiv	Karmøy	2,64	2,64	0,78	1,17					Cu, Zn	Fyl, Grstn	VMS	MS
Sum		**135,82**	**233,94**										
Restmalm		**98,12**											
Gjennomsnitt		**1,306**	**2,146**	**1,67**	**2,74**	**0,35**	**31,32**	**0,05**	**0,74**				
STDV		**3,31**	**4,38**	**1,49**	**3,05**	**0,31**	**29,56**	**0,03**	**0,81**				
Antall, n		**104**	**109**	**112**	**95**	**35**	**40**	**9**	**35**				

Informasjon og data er tatt fra «Fennoscandian Ore Deposit Database (FOOD)», Fennoscandian Mineral Deposits (gtk.fi) .

*Forekomst representert kun ved stockwerk/stringer-sonen

Klassifikasjonen i «Type» er tatt fra databaasen: VMS – Volcanic Massive Sulfide, SedExhal – Sedimentary Exhalative, ExVo – Volcanic Exhalative, ÅreCu – Årekopper

Sortering i «Gruppe» er gjort i henhold til beskrivelsene av vertsbergart (se forklaring av forkortelser i Tabell 8.3)

Tab. 7.2 Kaledonske sulfidmalmforekomster gruppert som i Tabell 7.1. Gjennomsnittstall pr gruppe

Gruppe	Produsert Mt	Opprinnelig Mt	Cu%	Zn%	Au ppm	Ag ppm	Co%	Pb%
Gjennomsnitt alle	1,29	2,15	1,68	2,77	0,35	31,32	0,05	0,74

Antall, n	104	109	112	95	35	40	9	35
Gjennomsnitt MV	2,05	3,04	1,80	2,39	0,46	33,20	0,07	0,40
Antall, n	31	32	32	24	7	5	6	7
Gjennomsnitt SD	0,84	1,09	1,93	3,00	0,39	33,79	0,01	1,43
Antall, n	33	34	36	29	8	13	1	9
Gjennomsnitt MS	1,59	2,45	1,88	1,73	0,27	76,00	0,04	1,90
Antall, n	13	13	14	10	3	2	2	1
Gjennomsnitt MA	1,51	2,34	1,27	1,88	0,32	3,90		0,04
Antall, n	4	4	4	4	2	1	0	1
Gjennomsnitt A	0,99	2,34	1,10	2,68	0,27	32,33		0,44
Antall, n	8	8	8	9	7	7	0	7
Gjennomsnitt SA	0,45	3,23	1,08	2,41	0,60	22,38		0,19
Antall, n	6	7	8	9	2	4	0	4
Gjennomsnitt SV	0,80	1,52	1,11	4,53	0,24	21,99		0,71
Antall, n	9	11	10	10	6	8	0	6

Sortering i «Gruppe» er gjort i henhold til beskrivelsene av vertsbergart (se forklaring av forkortelser i Tabell 8.3)

Forkortelser brukt i Tabell 7.1 og Tabell 7.2

Forkortelse	Bergart	Gruppe	Vertsbergart-assosiasjoner
Grstn	Grønnstein	A	Sure vulkanitter og intrusjoner
And	Andesitt	MA	Mafiske og sure vulkanitter og intrusjoner
Rhyd	Rhyodacitt	MV	Mafiske vulkanitter og intrusjoner
Dac	Dacitt	MS	Mafiske vulkanitter og sedimenter
Qzk	Kvartskeratofyr	SA	Sedimenter, og sure vulkanitter og intrusjoner
Qzp	Kvartsporfyr	SD	Metasedimenter
Fels	Felsisk vulkanitt	SV	Metasedimenter og vulkanitter
Grsk	Grønnskifer		
Dol	Doleritt		
Amf	Amibolitt		
Maf	Mafiske vulkanitter/intrusiver		
Fyl	Fyllitt		
Glgn	Glimmergneis		
Rhyl	Rhyolitt		
Glsk	Glimmerskifer		
Klkfyl	Kalkholdig fyllitt		
Trd	Trondhjemitt		
Qzglsk	Kvartsglimmerskifer		
Svsk	Svartskifer		
Sersk	Serisittskifer		
Grtglsk	Granat-glimmerskifer		
Gfglsk	Grafitt-glimmerskifer		
Gf	Grafitt		
Msst	Metasandstein		

Prf	Porfyr		
Gffyl	Grafitt-fyllitt		
Andprf	Andesittporfyr		
Grv	Gråvakke		
Qzt	Kvartsitt		
Grtklsk	Granat-klorittskifer		
Klsed	Klorittisk sediment		
Vlk	Vulkanitter		
Msd	Metasediment		
Kst	Kiselstein		
Plava	Putelava		

Tab. 7.3 Tall fra Tabell 1 i Hannington et al. (2010). Kun tall fra midt-oseanrygger er tatt med

Spredningsrygg, Forekomst	Areal m^2	Antall, n	Cu %	Zn %	Au ppm	Ag ppm
Juan de Fuca, Explorer						
S. Explorer	5000	51	3,2	5,4	0,72	125
Endeavour,High	3000	49	1,9	9,6	0,28	63
Endeavour, Main field	5000	97	2,6	6,7	0,14	260
Endeavour, Clam bed		5	0,3	2,8	0,12	145
Endeavour, Mothra	5000	20	3,3	14,9	0,05	105
Co-axial		6		23,2	0,98	59
Northern cleft		26	1,7	26,6	0,25	225
Southern cleft		16	1,1	30,9	0,11	230
East Pacific Rise						
21°N EPR		46	5,4	12,2	0,12	83
21°N Green Seamount		6	2,6	0,2	0,16	1
14°N EPR		5	2,8	4,7	0,51	48
13°N EPR	5000	71	6,4	11,1	0,45	61
13°N Seamount	30000	13	2,4	4,3	0,8	32
11°30'N EPR		23	3,2	1,8	0,25	23
11°32'N EPR		32	3,4	0,1	0,13	4
11°N EPR		18	1,6	26,6	0,15	37
09°50'N EPR		29	7,9	6,3	-	
07°24'S EPR		14	11,1	2,1	0,05	23
16°43'S EPR		19	10,2	8,5	0,32	55
17°26'S EPR		-	1,3	5,6	0,1	31
18°25'S EPR		35	4,7	18,6	0,58	170
21°30'S EPR		28	9,8	4,3	0,41	62
21°50'S EPR		-	2,4	21,7	0,36	120
37°40'S ERPR		24	3,8	3,1	0,82	40
Galapagos rift 86°W	30000	128	4,5	3,5	0,29	35
Indian Ocean						
Sonne field, CIR	50000	35	13,1	3	1,02	46
Kairei field, CIR	3000	8	20,4	10,3	7,99	101

Edmond field, CIR	3000	17	6,5	10,7	4,01	188
Mt. Jourdanne, SWIR		9	1,9	16,7	4,29	630
Mid-Atlantic Ridge						
Broken spur	5000	76	4,9	3,7	1,64	30
24°30'N, MAR	-	16,2	4,1	5,3		
TAG, surface & core	30000	310	4,9	6,5	1,80	92
Mir	50000	137	5	8,7	4,2	115
Alvin	100000	7	2	0,3	0,85	17
Snakepit	15000	93	6,5	4,6	0,1	70
Krasnov	150000	144	1,74	0,69	0,76	26
Semyenov	300000	21	2,48	2,39	3,60	53
Turtle pits, 5°S	5000	43	7	2,3	0,26	17
Nibelungen, 8°S		9	17,3	16,2	8,95	37
Lucky	3000	36	4,5	2	0,08	35
Axial volcano, CASM		31	0,3	16,3	4,12	250
Axial volcano, ASHES		90	2,3	17,3	1,56	295
Rainbow	30000	62	11	18	2,53	189
Ashadze-1	50000	104	10,5	17,64	3,5	88
Ashadze-2	50000	23	17,7	0,83	11,1	8
Logatchev-1	5000	78	33,19	4,3	14	56
Logatchev-2	1000	5	15,93	28,06	21,5	79
Middle Valley	50000	100	1,1	2,8	0,16	7
Escanaba trough	1000	51	1,8	5,6	1,29	163
Guaymas basin	15000	22	0,4	2,2	0,15	82
Gjennomsnitt	37000	48	6,00	9,22	2,24	98,14
STDAV	62727	54	6,28	8,32	4,13	108,05
Høyeste verdi	300000	310	33,19	30,90	21,50	630,00
Laveste verdi	1000	5,00	0,30	0,10	0,05	1,00

7.3 Tabeller for gehalter i manganskorper

Tabellene her oppsummerer målte verdier for metallinnhold i skorper fra seks områder.

Verdiene fra tabell Tab. 7.4 er brukt som basis for ressursberegningen for Jan Mayen-ryggen.

Tab. 7.4 Gehalter for Jan Mayen-ryggen

Metall	Enhet	Antall	Gjennomsnitt	Standardavvik	Høyeste verdi	Laveste verdi
Mn	% wgt	11	12,55	5,27	20,00	4,67
Ti	% wgt	11	1,27	0,27	1,60	0,80
Mg	% wgt	11	2,40	0,43	3,21	1,86
Li	ppm	11	131,82	50,76	212,57	54,65
Sc	ppm	11	36,77	7,33	51,39	27,44
V	ppm	11	1149,58	256,72	1651,04	839,24
Co	ppm	11	1155,72	580,79	2390,36	551,10
Nb	ppm	11	88,86	46,37	160,23	47,27

Hf	ppm	11	9,62	3,00	14,68	5,32
W	ppm	11	35,00	13,35	61,62	16,05
Ga	ppm	11	15,88	3,59	21,22	7,97
Y	ppm	11	153,51	71,42	332,20	88,76
La	ppm	11	174,49	101,27	421,24	93,38
Ce	ppm	11	574,25	423,15	1494,64	192,64
Pr	ppm	11	44,77	24,37	102,62	22,71
Nd	ppm	11	186,34	99,10	426,57	103,70
Eu	ppm	11	10,46	5,27	22,77	5,93
Gd	ppm	11	44,04	22,78	99,73	24,92
Tb	ppm	11	6,79	3,45	15,08	3,89
Dy	ppm	11	40,53	20,13	88,09	21,77

Verdiene fra tabell Tab. 7.5 er brukt som basis for ressursberegningen i den vestlige delen av Vøringutstikkeren.

Tab. 7.5 Gehalter for Ægirbassenget og Jan Mayen-trauet

Metall	Enhet	Antall	Gjennomsnitt	Standardavvik	Høyeste verdi	Laveste verdi
Mn	% wgt	39	19,49	6,70	30,26	1,96
Ti	% wgt	39	1,33	0,50	2,80	0,54
Mg	% wgt	39	2,29	0,46	3,41	1,70
Li	ppm	39	121,96	98,98	328,60	27,64
Sc	ppm	38	46,19	9,75	73,79	25,49
V	ppm	39	1569,20	386,73	2083,19	602,58
Co	ppm	39	2407,30	1306,51	6073,00	465,40
Nb	ppm	39	76,98	34,56	175,70	27,16
Hf	ppm	39	12,34	3,01	17,09	5,35
W	ppm	38	97,62	60,82	195,04	11,03
Ga	ppm	38	9,88	6,13	28,06	3,40
Y	ppm	39	270,75	93,53	398,97	82,53
La	ppm	39	371,85	173,78	612,14	76,39
Ce	ppm	39	1268,51	621,18	2129,29	122,01
Pr	ppm	39	97,86	45,92	161,04	20,65
Nd	ppm	39	404,59	187,02	660,48	87,01
Eu	ppm	39	21,92	9,68	35,61	5,38
Gd	ppm	39	90,37	38,70	141,25	23,02
Tb	ppm	39	13,77	5,78	21,74	3,58
Dy	ppm	39	79,00	31,24	122,46	23,07

Verdiene fra tabell Tab. 7.6 er brukt som basis for ressursberegningen i den østlige delen av Vøringutstikkeren.

Tab. 7.6 Gehalter for Vøringutstikkeren

Metall	Enhet	Antall	Gjennomsnitt	Standardavvik	Høyeste verdi	Laveste verdi
Mn	% wgt	10	15,18	8,68	28,45	1,22
Ti	% wgt	10	1,39	0,65	2,34	0,53

Mg	% wgt	10	2,06	0,70	3,55	0,84
Li	ppm	10	308,51	275,07	918,52	48,22
Sc	ppm	10	36,36	12,97	60,07	13,29
V	ppm	10	937,04	518,71	1825,95	243,70
Co	ppm	10	1782,35	1399,58	4221,52	184,30
Nb	ppm	10	62,47	27,14	109,27	32,10
Hf	ppm	10	10,53	4,21	17,59	4,04
W	ppm	10	49,15	34,17	92,74	2,72
Ga	ppm	10	14,18	6,06	23,50	6,91
Y	ppm	10	180,33	111,67	352,27	37,49
La	ppm	10	193,05	124,24	402,66	46,70
Ce	ppm	10	870,45	609,26	1753,25	134,20
Pr	ppm	10	51,50	32,62	106,01	12,44
Nd	ppm	10	214,01	133,57	439,57	52,07
Eu	ppm	10	12,63	7,80	25,03	2,50
Gd	ppm	10	54,58	33,97	107,78	10,67
Tb	ppm	10	8,68	5,43	17,06	1,66
Dy	ppm	10	51,88	32,41	98,91	9,38

Verdier fra Tab. 7.7 er brukt som basis for ressursberegningen for den østlige delen av Mohnsryggen og den østlige delen av Knipovitsjryggen.

Tab. 7.7 Gehalter for Lofoten Basin Seamount

Metall	Enhet	Antall	Gjennomsnitt	Standardavvik	Høyeste verdi	Laveste verdi
Mn	% wgt	20	13,61	4,27	20,20	1,60
Ti	% wgt	20	0,52	0,26	1,06	0,19
Mg	% wgt	20	1,70	0,37	2,49	1,30
Li	ppm	20	151,73	115,49	491,70	32,21
Sc	ppm	20	25,42	6,30	37,63	17,91
V	ppm	20	1063,97	354,33	1638,79	662,07
Co	ppm	20	1150,79	756,83	2457,00	362,00
Nb	ppm	20	29,88	16,73	62,25	9,96
Hf	ppm	20	6,73	3,25	13,87	2,59
W	ppm					
Ga	ppm					
Y	ppm	20	141,88	72,00	259,86	60,25
La	ppm	20	187,87	133,43	419,30	71,53
Ce	ppm	20	714,28	559,80	1949,00	184,10
Pr	ppm	20	52,96	37,14	118,10	19,89
Nd	ppm	20	219,89	152,80	489,50	83,26
Eu	ppm	20	11,76	7,74	25,28	4,46
Gd	ppm	20	48,72	31,39	103,20	18,38
Tb	ppm	20	7,50	4,71	15,46	2,78
Dy	ppm	20	41,54	25,32	83,82	15,74

Verdier fra Tab. 7.8 er brukt som basis for ressursberegningen for den indre, vestlige delen av Mohnsryggen.

Tab. 7.8 Gehalter for Greenland Basin Seamount/Greenland Sea East

Metall	Enhet	Antall	Gjennomsnitt	Standardavvik	Høyeste verdi	Laveste verdi
Mn	% wgt	42	11,70	3,71	17,65	0,05
Ti	% wgt	42	0,54	0,17	1,00	0,28
Mg	% wgt	41	1,59	0,22	2,18	1,28
Li	ppm	25	109,83	66,26	292,30	38,39
Sc	ppm	42	35,44	7,03	55,57	16,83
V	ppm	42	1306,64	257,77	1674,00	186,24
Co	ppm	42	2323,75	1008,41	4047,00	16,12
Nb	ppm	42	48,41	20,23	107,90	12,95
Hf	ppm	42	10,06	2,05	14,24	3,07
W	ppm					
Ga	ppm					
Y	ppm	42	217,18	55,86	316,10	24,73
La	ppm	42	304,80	95,86	473,20	35,19
Ce	ppm	42	1292,40	410,75	2041,00	74,30
Pr	ppm	42	83,38	25,77	134,90	9,07
Nd	ppm	42	342,75	103,81	537,20	35,52
Eu	ppm	42	18,44	5,25	27,61	1,60
Gd	ppm	42	78,07	21,79	109,90	5,97
Tb	ppm	42	11,96	3,20	16,44	0,90
Dy	ppm	42	65,90	17,48	89,57	4,91

Verdier fra Tab. 7.9 er brukt som basis for ressursberegningen for den ytre, vestlige delen av Mohnsryggen og den vestlige delen av Knipovitsjryggen.

Tab. 7.9 Gehalter for Greenland Sea West

Metall	Enhet	ANTALL	Average	STDV	Høyeste verdi	Laveste verdi
Mn	% wgt	15	12,11	3,49	18,07	7,29
Ti	% wgt	15	0,47	0,12	0,67	0,30
Mg	% wgt	15	1,45	0,25	2,04	1,15
Li	ppm					
Sc	ppm	15	41,79	10,79	72,58	32,85
V	ppm	15	1395,33	242,62	1974,00	989,00
Co	ppm	15	2323,83	777,37	3635,00	810,40
Nb	ppm	15	51,60	13,60	88,59	32,52
Hf	ppm	15	10,84	2,57	19,31	8,63
W	ppm					
Ga	ppm					
Y	ppm	14	219,53	30,22	252,90	167,60
La	ppm	15	256,63	60,64	354,60	149,50
Ce	ppm	15	1265,36	229,09	1774,00	951,10
Pr	ppm	15	72,05	15,65	96,64	44,83

Nd	ppm	15	294,26	61,65	395,60	192,10
Eu	ppm	15	16,37	2,88	21,11	12,14
Gd	ppm	15	71,81	12,02	92,82	54,97
Tb	ppm	15	10,88	1,70	13,96	8,44
Dy	ppm	15	62,15	8,96	78,02	48,44

7.4 Ressurstabeller for letemodeller og delområder

Sulfider

Tab. 7.10 Metallmengder i flankemodellen

Metall	P95	Forventning	P05
Cu (mill tonn)	21,9	31,4	40,7
Zn (mill tonn)	17,8	25,5	32,9
Co (mill tonn)	0,6	1,0	1,3
Ag (tonn)	43 760	63 230	82 540
Au (tonn)	1 240	1 780	2 300

Tab. 7.11 Metallmengder i aksialmodellen

Metall	P95	Forventning	P05
Cu (mill tonn)	1,9	2,9	3,9
Zn (mill tonn)	2,4	3,6	4,9
Co (mill tonn)	0,0	0,0	0,0
Ag (tonn)	3 490	5 260	7 190
Au (tonn)	87	134	185

Tab. 7.12 Metallmengder i gruntvannsmodellen

Metall	P95	Forventning	P05
Cu (mill tonn)	2,6	3,9	5,2
Zn (mill tonn)	10,8	15,9	21,2
Co (mill tonn)	0,0	0,0	0,0
Ag (tonn)	11 360	16 720	22 320
Au (tonn)	275	402	535

Manganskorper

Tab. 7.13 Skorperessurser på Mohnsryggen

Metall	P95	Forventning	P05
Mn (millioner tonn)	75,9	125,3	184,1
Ti (millioner tonn)	3,0	5,0	7,4
Mg (millioner tonn)	9,4	15,4	22,6
Li (tonn)	79 000	156 700	274 900
Sc (tonn)	23 200	39 700	59 700
V (tonn)	812 800	1 374 500	2 052 200
Co (tonn)	1 291 300	2 242 400	3 383 700
Nb (tonn)	28 700	49 700	74 600

Hf (tonn)	6 100	10 500	15 700
W (tonn)	24 600	53 000	97 400
Ga (tonn)	7 800	13 700	21 000
Y (tonn)	125 700	215 500	321 400
La (tonn)	155 400	264 100	394 200
Ce (tonn)	718 400	1 236 500	1 854 700
Pr (tonn)	43 400	73 800	110 400
Nd (tonn)	178 000	302 100	449 800
Eu (tonn)	9 800	16 600	24 700
Gd (tonn)	42 100	72 100	107 800
Tb (tonn)	6 400	11 000	16 400
Dy (tonn)	36 100	62 000	92 500

Tab. 7.14 Skorperessurser på Knipovitsjryggen

Metall	P95	Forventning	P05
Mn (millioner tonn)	19,6	35,3	55,2
Ti (millioner tonn)	0,8	1,4	2,1
Mg (millioner tonn)	2,4	4,3	6,7
Li (tonn)	20 300	45 000	84 900
Sc (tonn)	5 600	10 000	15 700
V (tonn)	198 000	356 400	557 900
Co (tonn)	288 700	532 800	844 000
Nb (tonn)	6 800	12 200	19 300
Hf (tonn)	1 400	2 600	4 100
W (tonn)	6 700	16 900	33 800
Ga (tonn)	1 900	3 700	6 100
Y (tonn)	29 700	53 500	84 000
La (tonn)	35 700	64 700	102 100
Ce (tonn)	164 500	298 400	471 800
Pr (tonn)	10 000	18 200	28 700
Nd (tonn)	41 000	74 600	117 700
Eu (tonn)	2 300	4 100	6 500
Gd (tonn)	9 800	17 800	28 000
Tb (tonn)	1 500	2 700	4 200
Dy (tonn)	8 400	15 300	24 000

Tab. 7.15 Skorperessurser på Jan Mayen-ryggen

Metall	P95	Forventning	P05
Mn (millioner tonn)	1,7	3,9	7,2
Ti (millioner tonn)	0,2	0,4	0,7
Mg (millioner tonn)	0,3	0,7	1,3
Li (tonn)	1 800	4 100	7 400
Sc (tonn)	500	1 100	2 000
V (tonn)	15 600	35 400	63 900
Co (tonn)	15 000	35 500	66 300

Nb (tonn)	1 200	2 700	5 100
Hf (tonn)	100	300	500
W (tonn)	500	1 100	2 000
Ga (tonn)	200	500	900
Y (tonn)	2 000	4 700	8 800
La (tonn)	2 200	5 400	10 200
Ce (tonn)	6 900	17 600	34 200
Pr (tonn)	600	1 400	2 600
Nd (tonn)	2 400	5 700	10 800
Eu (tonn)	100	300	600
Gd (tonn)	600	1 400	2 500
Tb (tonn)	100	200	400
Dy (tonn)	500	1 200	2 300

Tab. 7.16 Skorperessurser på Vøringutstikkeren

Metall	P95	Forventning	P05
Mn (millioner tonn)	7,6	21,1	42,2
Ti (millioner tonn)	0,6	1,6	3,2
Mg (millioner tonn)	1,3	3,7	7,3
Li (tonn)	8 200	24 100	48 900
Sc (tonn)	1 800	5 000	10 000
V (tonn)	56 700	156 000	313 000
Co (tonn)	92 300	256 300	512 600
Nb (tonn)	3 100	8 500	16 900
Hf (tonn)	500	1 400	2 700
W (tonn)	3 300	9 200	18 700
Ga (tonn)	500	1 400	2 800
Y (tonn)	10 200	27 800	55 700
La (tonn)	12 800	35 500	70 700
Ce (tonn)	47 400	131 600	262 400
Pr (tonn)	3 400	9 400	18 900
Nd (tonn)	13 900	38 900	78 100
Eu (tonn)	800	2 200	4 300
Gd (tonn)	3 200	9 000	18 000
Tb (tonn)	500	1 400	2 800
Dy (tonn)	2 900	8 100	16 100

7.5 Nærmere om metaller - beskrivelse, utvinning, reserver og ressurser

Omtale av metaller nedenfor er i stor grad basert på NGU's beskrivelser (NGU, 2023). Tall for utvinning (primærproduksjon) og reserver i 2020 er i all hovedsak hentet fra U.S. Geological Survey (U.S. Geological Survey, 2022). Tall for utvinning av sjeldne jordarter er hentet fra Minor Metals Trade Association (MMTA, 2022).

7.5.1 Basemetaller

Basemetaller er metaller som oksideres når de varmes opp i kontakt med luft, og som verken er jern- og jernlegeringsmetaller eller edelmetaller. Basemetallene omfatter bl.a. kobber (Cu), sink (Zn) og kobolt (Co). Kobolt brukes i jernlegeringer og er beskrevet under denne kategorien.

Kobber (Cu)
Kobber fremstilles hovedsakelig fra konsentrater av kobbersulfider som kan utvinnes fra ulike forekomsttyper. Kobber brukes først og fremst som kobbertråd til elektriske ledere og i elektronikk, for eksempel trykte kretskort. Kobber legeres med gull og sølv til smykker, med tinn til bronse og med sink til messing.

I 2020 ble det i verden produsert 20,6 millioner tonn kobber. De største produsentene var Chile (5,7 mill. tonn), Peru (2,2 mill. tonn) og Kina (1,7 mill. tonn). Globale kobberreserver er 880 mill. tonn. Globale påviste kobberressurser ble i 2015 anslått til 2,1 mrd. tonn.

Sink (Zn)
Sink utvinnes hovedsakelig fra sinkblende som opptrer i en rekke forskjellige typer av komplekse sulfidmalmer. Sink brukes i stor grad til galvanisering, som anodemateriale i batterier, pigment i maling (sinkoksid) og i legering med kobber til messing.

I 2020 ble det produsert 12 millioner tonn sink. De tre største produsentene var Kina (4,1 mill. tonn), Peru (1,3 mill. tonn) og Australia (1,3 mill. tonn). Globale sinkreserver er 250 mill. tonn. Globale påviste sinkressurser er anslått til 1,9 mrd. tonn.

7.5.2 Edelmetaller

Edelmetaller er metaller som kjemisk sett er lite reaktive med tanke på korrosjon og oksidasjon. Metallene er relativt sjeldne og av høy økonomisk verdi. De mest kjente edelmetallene er gull og sølv (men også platinagruppens metaller og rhenium inkluderes blant edelmetallene).

Gull (Au)
Gull er et mykt, skinnende og lett formbart metall. Gull brukes fremfor alt som verdielement og i smykker. Gull har meget gode lederegenskaper for både elektrisitet og varme og er et viktig element i elektronikkindustrien. Metallet brukes også i tannindustrien, spesielt i kroner og broer.

Malmer hvor gull er hovedprodukt dannes gjerne ved hydrotermale prosesser (varme løsninger). Ellers er gull et viktig biprodukt ved prosessering av magmatiske nikkel,-kobber- og platinamalmer, samt vulkanogene kismalmer (VMS) med kobber og sink og porfyr-kobbermalmer.

I 2020 ble det på verdensbasis produsert 3 030 tonn gull, hvorav Kina (365 tonn), Australia (328 tonn), og Russland (305 tonn) var de største produsentene. Globale gullreserver er 54 000 tonn.

Sølv (Ag)
Sølv har høyere ledningsevne for varme og elektrisitet enn noe annet metall, og er et meget smibart materiale. Det har også en meget høy glans. I likhet med gull brukes også

sølv som verdielement og i smykker. De viktigste anvendelsene er til fotografiske formål, elektronikk, i mynter, forsølving, smykker, som katalysator, til vannrensing og i medisin.

Sølv forekommer rent (gedigent), i form av sulfider eller bundet til arsen og/eller antimon. Det utvinnes i stor grad som biprodukt ved prosessering av kobber-, sink- eller blyforekomster av forskjellig opprinnelse. Rene sølvmalmer finnes som gangforekomster.

Verdensproduksjonen i 2020 var 23 500 tonn, hvor Mexico (5 540 tonn), Kina (3 380 tonn) og Peru (2 770 tonn) var de største produsentene. Globale sølvreserver er 530 000 tonn.

7.5.3 Spesialmetaller

Det finnes en rekke metalliske grunnstoffer som verken kan klassifiseres som jern- og jernlegeringsmetaller, basemetaller, energimetaller eller edelmetaller. NGU kategoriserer gruppen som "spesialmetaller", hvor bl.a. niob (Nb), hafnium (Hf), scandium (Sc), yttrium (Y) og de 15 lantanoidene – samlet betegnet som sjeldne jordartselementer (REE; Rare Earth Elements) – inkluderes.

Niob (Nb)
Niob fremstår i ren form som et lysegrått metall. Det er mykt og formbart og kan lett valses og smis. Den viktigste bruken av niob er som legeringsgrunnstoff i lavlegerte og rustfrie stål samt høytemperaturlegeringer[1]. Niob brukes i stål- og superlegeringer til fly- og rakettmotorer.

Niob (Nb) og tantal (Ta) finnes ofte i de samme forekomstene, da de kan erstatte hverandre i ulike mineraler. De viktigste Nb-førende mineralene er columbitt, euxenitt, fergusonitt og pyroklor (NGU, 2023).

Verdensproduksjonen av niob i 2020 var på 67 700 tonn, med Brasil som største produsent (59 800 tonn), etterfulgt av Canada (6 500 tonn). Globale niobreserver overstiger 17 mill. tonn. Verdens ressurser av niob anslås å være tilstrekkelig for fremtidige behov.

Hafnium (Hf)
Hafnium er et sølvhvitt, mykt og smibart metall med et svært høyt smeltepunkt på 2503 °C. Det oksideres lett, men beskyttes av et tynt, tett oksidlag, i likhet med aluminium. Hafnium brukes som absorpsjonsmateriale i kjernereaktorer. Metallet brukes også som legeringsgrunnstoff i høytemperaturlegeringer og som getter i høyvakuumteknikk.

I naturen forekommer hafnium i zirkoniummineraler. Kommersielt fremstilles hafnium fra konsentrater av zirkon, $ZrSiO_4$, som inneholder 0,5-2 pst. hafnium[2].

Tall på verdensproduksjon og -reserver av hafnium er ikke tilgjengelige. I 2020 var global produksjon av zirkoniummalm og -konsentrat på 1,2 mill. tonn bruttovekt. Australia (400 000 tonn), Sør-Afrika (280 000 tonn) og Kina (140 000 tonn) var største produsenter. Globale reserver av zirkonium (ZrO_2) er 70 mill. tonn.

Litium (Li)

Litiumkarbonat og -silikat anvendes i produksjon av glass og keramikk for å senke smeltepunktet. Litiumkjemikalier inngår i et stort spekter av produkter, inkludert forskjellige typer av litiumbatterier. Metallisk litium anvendes i fremstilling av aluminium-litium og magnesium-litium-legeringer som er meget lette og egnet til bruk i flyindustrien. Litiumkonsumet for batterifremstilling har vokst betydelig i de senere år.

Den største delen av Li-utvinning kommer fra saltsjøer i form av litiumkarbonat. I 2020 ble det produsert 82 500 tonn litium. De største produsentene var Australia (39 700 tonn), Chile (21 500 tonn) og Kina (13 300 tonn). Globale litiumreserver er 22 mill. tonn. Globale påviste litiumressurser er anslått til 89 mill. tonn.

Sjeldne jordartsmetaller (REE): yttrium (Y), scandium (Sc) og lantanider

Metallene av de sjeldne jordartselementene (REE) brukes i bilkatalysatorer, metallurgisk industri, TV- og dataskjermer, (permanente) magneter, ulike lys og til oljeraffinering. Eksempelvis brukes terbium (Tb) i fosforlegeringer i lamper og skjermer, og blant annet sammen med dysprosium (Dy) for å lage sterke og lette magneter som også beholder sine egenskaper under høye temperaturer. Disse magnetene brukes i både i hybridbilmotorer, vindturbiner og nedkjøling av kjernekraftreaktorer. Neodym (Nd) brukes blant annet i harddisker og hodetelefoner. Yttrium (Y) og europium (Eu) brukes blant annet for å generere rød farge i tv-skjermer/pc-skjermer. Scandium (Sc) benyttes i legeringer med aluminium for å gi stor styrke, særlig til fly- og luftfart, samt til spesielle lyskilder.

I 2020 ble det på verdensbasis produsert 240 000 tonn sjeldne jordarts-oksid (REO), med Kina (140 000 tonn), USA (39 000 tonn) og Myanmar (31 000 tonn) som største produsenter. Globale REO-reserver er 120 mill. tonn. Produksjonen av scandiumoksid på verdensbasis er beskjeden, omkring 2000 kg/år. Scandium er produsert som biprodukt og det finnes ikke gruvedrift som er basert bare på Sc-utvinning. Verdensproduksjonen av yttrium i REE-konsentrater er 8 000 – 12 000 t/år. Globale reserver av yttriumoksid-ekvivalenter (Y_2O_3) er anslått til >500 000 tonn (U.S. Geological Survey, 2022).

Lantan (La)

Lantan er et sølvhvitt metall. Det er så mykt at det kan skjæres med kniv, og er derfor svært lett å forme og valse. Lantan brukes som tilsetning til høytemperaturlegeringer for å forbedre oksidasjonsbestandigheten. Det brukes som tilsetning til jern og stål for å fjerne forurensninger av oksygen og svovel.

Lantan fremstilles fra anriket monazitt eller bastnäsitt[3]. Verdensproduksjonen av lantan er anslått til 12 500 tonn per år. USA, Brasil India, Sri Lanka og Australia er største produsenter. Globale reserver anslås til 6 mill. tonn. Lantan anslås å være den minst sjeldne av de sjeldne jordartene[4].

Cerium (Ce)

Cerium er et mykt metall med farge og glans som jern. Cerium-metall anvendes i legering med andre lantanoider til en rekke formål. Tilsats av små mengder cerium (cirka 0,1 pst.) til høytemperaturlegeringer gir økt bestandighet mot korrosjon ved høye temperaturer.

I naturen finnes cerium i form av en rekke mineraler. Cerium utgjør 68 ppm av jordskorpen, og er det mest utbredte av lantanoidene[5].

Cerium utvinnes fra mineralganger av monazitt eller bastnäsitt. Verdensproduksjonen av cerium er anslått til 24 000 tonn per år. De viktigste utvinningsområdene er som for andre sjeldne jordarter: USA, Brasil, India, Sri Lanka, Australia og Kina[6].

Praseodym (Pr)

Praseodym er et sølvglinsende metall som er lett å forme og uedelt (oksideres lett i luft og vann). Sammen med andre lantanoider brukes praseodym blant annet som katalysator, i fosforer og lasermaterialer, og som tilsetning i legeringer.

Praseodym utgjør 7,6 ppm av jordskorpen og er vanligere enn metaller som tinn, wolfram og sølv. Metallet forekommer sammen med andre lantanoider i mineraler som monazitt og cerritt[7]. Årlig produksjon er omtrent 2 500 tonn[8], med 2 mill. tonn i globale reserver[9].

Neodym (Nd)

Neodym er et sølvhvitt, duktilt (formbart) metall. Den viktigste anvendelsen for neodym er som (permanent) magnet, for bruk i bl.a. harddisker, vindturbiner og batterier[10].

Nest etter cerium og lantan er neodym det vanligste av lantanoidene. I jordskorpen forekommer det gjennomsnittlig i større mengder enn metaller som bly, tinn, sølv og gull[11]. Monazitt og enkelte forekomster av bastnäsitt er viktigste kilder. Global produksjon av neodym i 2020 var 35 000 tonn (KU Leuven, 2022). Kina, USA, Brasil, India, Sri Lanka og Australia er viktigste produsenter, hvor Kina dominerer produksjonen. Globale reserver av neodym anslås til 8 mill. tonn[12].

Europium (Eu)

Europium er et metall som er sølvglinsende, pyrofort (selvantennelig) og like mykt som bly. Europium har viktige industrielle anvendelser, bl.a. i kontrollstaver i kjernereaktorer og for å generere den røde fargen i billedrør.

Europium fremstilles fra mineralene monazitt, bastnäsitt og xenotim-(Y). Det er det mest sjeldne av lantanoidene, men finnes allikevel i større mengder i jordskorpen enn metaller som sølv, gull og platina[13]. Kina er største produsent. Årlig verdensproduksjon av europium er omtrent 270 tonn[14].

Gadolinium (Gd)

Gadolinium er et sølvhvitt, duktilt og svært uedelt metall (korroderer raskt). Grunnstoffet brukes i kontrollstaver i kjernereaktorer og som nøytronabsorpsjonsmateriale. Gadoliniumholdig kontrastmiddel brukes ved MR-undersøkelser.

Gadolinium finnes i mineralene monazitt og bastnäsitt[15]. Verdensproduksjonen av gadolinium er anslått til 7 500 tonn per år, med Kina som største produsent. Globale reserver av gadolinium sies å være over 1 mill. tonn[16].

Terbium (Tb)

Terbium er metall som er sølvhvitt, duktilt og så bløtt at det kan skjæres med kniv. Det er uedelt, svært reaktivt og behandles i vakuum eller inaktive atmosfærer. Terbium brukes som aktivator i fosforer for røntgen- og elektronstråler[17], og med zirkonium i brenselceller.

Terbium er en av de sjeldneste sjeldne jordartene. Global produksjon er anslått til 10 tonn per år[18].

Dysprosium (Dy)

Dysprosium er et sølvglinsende metall og så mykt at det enkelt kan skjæres med kniv. Bruk av dysprosium har ofte få substitutter. Dysprosium brukes i magneter for å unngå tap av magnetisme ved høye temperaturer, i motorer, hjemmeelektronikk og i vindturbiner. Det høye smeltepunktet og evnen til å absorbere nøytroner gjør at det har vært brukt som legeringsmetall i deler til kjernekraftverk.

Dysprosium er sjeldent i naturen. Det finnes i mineraler som monazitt og bastnäsitt[19]. Global produksjon av dysprosium i 2020 var 2 500 tonn (KU Leuven, 2022). Kina er største produsent[20].

7.5.4 Jern, titan og jernlegering

Jern er det nest vanligste metallet på jorda og forbrukes i store mengder. Titan brukes i stållegeringer og rustfritt stål, mens jernlegeringsmetallene gir forskjellige egenskaper til stål og støpejern.

Titan (Ti)

Titan brukes i stållegeringer (ferro-titan), i rustfritt stål (for å minske karboninnholdet), og legeres blant annet med aluminium, vanadium, kobber, jern, mangan, molbybden og andre metaller. Valsede produkter som plater, barrer, wirer etc., kan brukes til en rekke formål innen industri, romfart, luftfart, medisin (som implantater og til instrumenter), sportsutstyr med mer.

I 2020 var global produksjon av titandioksid (TiO_2) fra ilmenitt og rutil på 8,6 mill. tonn, med Kina (2,8 mill. tonn), Sør-Afrika (1 mill. tonn) og Mosambik (0,96 mill. tonn) som største produsenter fra ilmenittkonsentrat, og Australia (190 000 tonn), Sierra Leone (114 000 tonn) og Ukraina (95 000 tonn) som største produsenter fra rutilkonsentrat. Globale reserver av titandioksid fra ilmenitt og rutil er 750 mill. tonn. Globale ressurser av anatas, ilmenitt og rutil er anslått til >2 mrd. tonn.

Jernlegeringsmetaller

Gruppen inkluderer bl.a. kobolt (Co), mangan (Mn), vanadium (V) og wolfram (W).

Kobolt (Co)

Kobolt produseres vanligvis som biprodukt ved kobber- og nikkelproduksjon. Kobolt kan danne kjemiske forbindelser med nesten alle grunnstoffer. Det gjør at kobolt har en rekke bruksområder og er et viktig metall i miljøvennlig teknologi, bl.a. som legering i elektrodene til oppladbare batterier. Ellers brukes kobolt også i superlegeringer og hardmetall-legeringer, korrosjons- og værbestandige legeringer, og mye mer. Kobolt har også blitt brukt som blått fargestoff i glass og keramikk i flere tusen år.

I 2020 ble det på verdensbasis produsert 142 000 tonn kobolt, hvorav Kongo (98 000 tonn), Russland (9 000 tonn), og Australia (5 630 tonn) var de største produsentene. Globale koboltreserver er 7,6 mill. tonn. Påviste globale koboltressurser på land er rundt 25 mill. tonn.

Mangan (Mn)

Mangan er et hardt paramagnetisk metall som lett oksideres. Det er viktig i jern- og stålproduksjon, og 85-90 pst. av verdensproduksjonen brukes her. Mangan er nødvendig i de fleste typer stål og krom og gjør stålet rustfritt. Mangan er en nøkkelbestanddel i

billig rustfritt stål og er mye brukt i aluminiumlegeringer. Det har også en rekke anvendelser innen kjemisk industri, som tilsetning i blyfri bensin for å øke oktantallet og redusere motorbanking.

I 2020 var verdens manganutvinning på 18,9 mill. tonn. De største produsentene var Sør-Afrika (6,5 mill. tonn), Australia (3,3 mill. tonn) og Gabon (3,3 mill. tonn). Globale manganmalm-reserver er 1,5 mrd. tonn. Landbaserte manganressurser er store, men ujevnt fordelt.

Vanadium (V)
Vanadium finnes i en rekke mineraler. Det utvinnes vanligvis som biprodukt fra raffinering av petroleum. Vanadium er et mykt metall med god motstandsdyktighet mot korrosjon av alkalier, svovelsyre og saltsyre. 80 pst. av alt vanadium som produseres, brukes i ferrovanadium eller som tilsetning i blant annet rustfritt stål til bruk i kirurgiske instrumenter og verktøy, og blandet med aluminium i titanlegeringer til bruk i jetmotorer. Det er en viktig karbidstabilisator i stålproduksjon og brukes i brenselsceller og batterier.

I 2020 ble det på verdensbasis produsert 105 000 tonn vanadium, hvor Kina (70 000 tonn), Russland (19 500 tonn), og Sør-Afrika (8 580 tonn) var de største produsentene. Globale vanadiumreserver er 24 mill. tonn. Globale ressurser av vanadium er anslått å overstige 63 mill. tonn.

Wolfram (W)
Wolfram (eng. tungsten) er et lysegrått metall. Det har det høyeste smeltepunktet av alle metaller, 3422 °C. Wolfram brukes som glødetråd i lyspærer. En annen viktig anvendelse er som legeringsgrunnstoff i stål, superlegeringer og annet. Wolframkarbid har høy hardhet og inngår i hardmetaller for bruk i borekroner, fjellbor o.a.

Wolfram utgjør 1 ppm av jordskorpen. I naturlig tilstand finnes wolfram blant annet i mineralene wolframitt og scheelitt[21].

I 2020 var verdens produksjon av wolfram på 78 400 tonn, hvor de største produsentene var Kina (66 000 tonn), Vietnam (4 500 tonn) og Russland (2 400 tonn). Globale reserver av wolfram er 3,7 mill. tonn. Verdens wolframressurser er geografisk spredt, men Kina er størst på ressurser og reserver.

7.5.5 Andre metaller

Gallium (Ga)
Gallium er et mykt, sølvglinsende metall som smelter allerede ved 30 °C. Med sitt lave smeltepunkt og høye kokepunkt er gallium flytende over et større temperaturområde enn noe annet grunnstoff. Gallium har lignende kjemiske egenskaper som aluminium. Det brukes blant annet i halvledere og som små partikler i skismøring.

Gallium forekommer i jordskorpen i omtrent samme mengder som bly. Det finnes imidlertid ikke i konsentrerte forekomster, bare spredt. Gallium fremstilles som et biprodukt ved fremstilling av aluminium og sink[22].

I 2020 var global produksjon av gallium 327 tonn. Kina var største produsent (317 tonn), etterfulgt av Russland (5 tonn) og Japan (3 tonn). Reserveestimater er ikke tilgjengelige. Produksjonen deles i lav- og høy-renhetsproduksjon, samt resirkulering. Global

produksjonskapasitet i 2021 er anslått til hhv. 774 tonn, 325 tonn og 273 tonn. Gjennomsnittlig galliumgehalt i bauxitt er 50 ppm. Galliumressurser i bauxitt overstiger 1 mill. tonn, pluss en betydelig mengde i sink. Under 10 pst. av disse galliumressursene forventes å være utvinnbare.

Magnesium (Mg)

Magnesium er et sølvhvitt, glinsende og mykt metall. Magnesium har liten tetthet, bare 25 prosent av stål, og er det letteste metallet som blir brukt i dag. Det er godt egnet til bruksgjenstander i form av legeringer som har større mekanisk styrke enn rent metall. Magnesium er et sterkt reduksjonsmiddel. I konstruksjoner er magnesium det mest brukte metallet etter stål og aluminium.

Magnesium utgjør 2,4 vektprosent av jordskorpen. I rekkefølgen av grunnstoffene i jordskorpen, er magnesium nummer seks. Magnesium er det tredje mest vanlige grunnstoffet i sjøvann[23].

I 2020 ble det på verdensbasis produsert over 27 mill. tonn magnesiumoksid, med Kina (19 mill. tonn), Brasil (1,8 mill. tonn) og Tyrkia (1,47 mill. tonn) som største kjente produsenter. Globale reserver av magnesiumoksid er 7,2 mrd. tonn. Magnesium blir framstilt kommersielt ved to metoder: elektrolyse av smeltet vannfritt magnesiumklorid og ved silikotermisk reduksjon av magnesiumoksid.

Den første metoden er den langt viktigste. Global produksjon av magnesium var i 2020 på 1 mill. tonn, med Kina (886 000 tonn), Russland (19 000 tonn) og Israel (19 000 tonn) som største kjente produsenter. Tilgangen på ressurser for utvinning av magnesium vurderes som tilnærmet ubegrenset.

1 Kofstad, Per K.; Pedersen, Bjørn (2022): niob i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra: https://snl.no/niob (Hentet 16. desember 2022).
2 Kofstad, Per K.; Pedersen, Bjørn (2022): hafnium i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/hafnium (Hentet 16. desember 2022).
3 Kofstad, Per K. (2022): lantan i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/lantan (Hentet 16. desember 2022).
4 https://mmta.co.uk/metals/la/ (Hentet 16. desember 2022).
5 Kofstad, Per K.; Pedersen, Bjørn (2022): cerium i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/cerium (Hentet 18. desember 2022).
6 https://mmta.co.uk/metals/Ce/ (Hentet 16. desember 2022).
7 Kofstad, Per K. (2022): praseodym i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/praseodym (Hentet 18. desember 2022).
8 Årlig produksjon på 11 000 tonn oppgis av KU Leuven, April 2022, Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge, 117 s.
9 https://mmta.co.uk/metals/Pr/ (Hentet 16. desember 2022).
10 https://mmta.co.uk/metals/Nd/ (Hentet 16. desember 2022).
11 Kofstad, Per K. (2022): neodym i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/neodym (Hentet 18. desember 2022).
12 https://mmta.co.uk/metals/Nd/ (Hentet 16. desember 2022).
13 Kofstad, Per K.; Pedersen, Bjørn (2022): europium i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/europium (Hentet 18. desember 2022).
14 https://mmta.co.uk/metals/Eu/ (Hentet 16. desember 2022).
15 Kofstad, Per K.; Pedersen, Bjørn (2022): gadolinium i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/gadolinium (Hentet 18. desember 2022).
16 https://mmta.co.uk/metals/Gd/ (Hentet 16. desember 2022).

17 Kofstad, Per K. (2022): terbium i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/terbium (Hentet 18. desember 2022).
18 https://mmta.co.uk/metals/Tb/ (Hentet 16. desember 2022).
19 Kofstad, Per K. (2022): dysprosium i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/dysprosium (Hentet 18. desember 2022).
20 https://mmta.co.uk/metals/Dy/ (Hentet 16. desember 2022).
21 Kofstad, Per K.; Pedersen, Bjørn (2022): wolfram i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/wolfram (Hentet 16. desember 2022).
22 Kofstad, Per K.; Pedersen, Bjørn (2022): gallium i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/gallium (Hentet 16. desember 2022).
23 Kofstad, Per K.; Pedersen, Bjørn; Kaland, Trine; Allkunne (2022): magnesium i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra https://snl.no/magnesium (Hentet 18. desember 2022).

8 Ordliste

Aksedal: Kontinuerlig dalføre langs midten av en oseansk spredningsrygg. Aksedalen oppstår som en innsynkning (et søkk) langs grensen mellom spredningsryggens to litosfæreplater der det kontinuerlig dannes ny jordskorpe etterhvert som litosfæreplatene glir fra hverandre.

Aksialforekomst: Sulfidforekomster som er dannet i vulkanske rygger utviklet i de sentrale deler av aksedalen.

Aktiv sulfidforekomst (se også definisjon av sulfidforekomst): Sulfidmineralisering er tilstede, væske med høy temperatur strømmer ut.

AUV (Autonomous Underwater Vehicle): Selvstyrt undervannsfarkost som utfører en rekke målinger på havbunn og i vannsøylen.

Avsetning: Mineralakkumulasjon på havbunnen; opptrer i forskjellige former og strukturer som lag, skorsteiner, kjegler og hauger.

Basalt: Den mest utbredte magmatisk bergarten på jorden. Hovedtyngden av klodens basalter dannes ved vulkanske utbrudd tilknyttet de oseanske spredningsryggene.

Bruddsone: Består av seismisk aktive deler der litosfæreplatene beveger seg sidelengs i forhold til hverandre og definerer transformforkastninger, og seismisk inaktive deler der platene på begge sider av bruddsonen beveger seg i samme retning.

Flankeforekomst: sulfidforekomst som er dannet i og langsetter de store hovedforkastningene som utgjør flankene av aksedalen.

Forekomst: Alle typer avsetninger av mineraler.

Forkastning: Struktur som dannes i jordskorpen ved at en del av jordskorpen beveger seg i forhold til en annen langs en bruddsone eller forkastningssone. Bevegelsen inntreffer etter en periode med spenningsoppbygning og kan generere jordskjelv når spenningene utløses og forkastningen beveger seg[1].

Geokjemi: For denne rapportens formål: kjemiske og fysiske vannparametre (metan, turbiditet, pH, og oks-red. potensialet) som måles under leting etter sulfidforkomster. Disse måles med sensorer påmontert AUV.

HiSAS: AUV-sensor med syntetisk apertur sonar, som gir en svært detaljert oppløsning av havbunnens topografi.

Hydrotermale (sulfid-)byggverk: Flere hydrotermale hauger og kjegler som henger sammen i en mer kompleks struktur.

Hydrotermal (sulfid-)haug: En hauglignenede struktur bygget opp av hydrotermale kjegler og kollapsede skorsteiner.

Hydrotermal kilde: Et sted der varm, mineralrik væske strømmer ut av havbunnen, ofte i forbindelse med vulkanske områder i randsonen mellom kontinentalplater.

Hydrotermal (sulfid-)kjegle: En kjegleformet struktur som bygges av mineralavsetninger rundt en hydrotermal skorstein

Hydrotermal (sulfid-)skorstein: En skorsteinslignende struktur som danner utløpet av den varme væsken i en hydrotermal kilde. Den bygges ved kontinuerlig utfelling av mineraler fra væsken som strømmer ut. Over tid kollapser de og bygger hauglignende avsetninger.

Hydrotermal væske: Vann fra varme kilder tilknyttet varmesentre under havbunnen.

Inaktiv sulfidforekomst (se også definisjon av sulfidforekomst): Sulfidmineralisering er tilstede, men ingen utstrømming av væske med høy temperatur.

Klassifikasjon: Sammenstilling av grupper eller klasser etter hvor like de er. Ordet klassifikasjon blir også brukt om resultatet av slik sammenstilling.

Litosfæreplate: Jordklodens ytre skall, litosfæren, er delt opp i plater (litosfæreplater) som «flyter» rundt på mantelen i jordens indre og derved beveger seg i forhold til hverandre.

Magnetometer (SCM): AUV-sensor som måler magnetisk felt.

Manganskorpe: Dannes ved at mineraler som er oppløst i sjøvann felles ut på fjellsider som oksid- og oksidhydroksidmineraler. Hovedkomponenter er jern og mangan.

MBES (Multi Beam Echo Sounder): Multistråle-ekkolodd for innsamling av dybdedata som gir topografien av havbunnen.

Ressurs: Elementer eller menneskelige egenskaper som kan utnyttes økonomisk, eller som er til nytte på annen måte. Naturressurser er luft, vann, dyrkbare arealer, petroleum, mineraler og andre råstoffer. Man skiller gjerne mellom fornybare og ikke-fornybare ressurser[2].

ROV (Remotely Operated Vehicle): Undervannsrobot som opererer på havbunn, og som er styrt fra overflaten.

SBP: AUV-sensor for bunnpenetrerende ekkoloddsdata. Måler tetthetskontraster (akustisk impedans) ned til noen ti-talls meter under havbunn og gir et bilde av sedimentenes lagdeling.

Sjøfjell: Undersjøisk fjell.

Slettelandskap: Omfatter sammenhengende arealer med mindre høydeforskjeller.

SP: AUV-sensor for måling av selvpotensial (elektriske egenskaper).

Spredningsakse: Området langs midten av aksedalen; altså ideelt sett aksen for spredningen av litosfæreplatene.

Spredningsgrøft: Et annet ord for aksedal.

Spredningsrygg: Også kalt midthavsrygg. Styrt av magmatiske prosesser glir jordens litosfæreplater fra hverandre langs oseanske spredningsrygger, og ny jordskorpe dannes. For norsk kontinentalsokkel og utredningsområdet gjelder dette Kolbeinseyryggen, Mohnsryggen og Knipovitsjryggen.

SSS: AUV-sensor for sidesøkende sonar. Gir et «skygge-relieff» av havbunn.

Sulfid: Sulfider er kjemiske forbindelser mellom svovel og en eller flere grunnstoffer. Denne rapporten handler om sulfidforbindelser mellom svovel og metalliske grunnstoffer.

Sulfidforekomst: I denne rapporten brukes begrepet sulfidforekomster om avsetninger med svovel og metaller avsatt som sulfidmineraler på og i havbunnen av hydrotermal aktivitet. Den enkelte sulfidforekomst er avsatt gjennom en egen hydrotermal sprekkekanal separat fra andre sulfidforekomster. Sulfidforekomstene på norsk kontinentalsokkel dannes naturlig tilknyttet de aktive spredningsryggene mellom Norge og Grønland.

Sulfid-teig: Naturlig avgrenset område med sulfidforekomster avsatt i hydrotermale strukturer som skorsteiner, byggverk eller hauger; geografisk separert fra andre sulfid-teiger.

1 Fossen, Haakon: forkastning i Store norske leksikon på snl.no. Hentet 6. januar 2023 fra https://snl.no/forkastning
2 naturressurs i Store norske leksikon på snl.no. Hentet 6. januar 2023 fra https://snl.no/naturressurs

9 Referanser

Agius, M. R., Harmon, N., Rychert, C. A., Tharimena, S. and Kendall, J. M., 2018. Sediment characterization at the equatorial Mid-Atlantic Ridge from P-to-S teleseismic phase conversions recorded on the PI-LAB experiment. Geophysical Research Letters, 45(22)

Barrie, C.T. and Hannington, M.D. 1999. Classification of Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits Based on Host- Rock Composition. Reviews in Economic Geology, v. 8, p 1 – 11. DOI: 10.5382/Rev.08.01

Baumberger, T., Früh-Green, G.L., Thorseth, I.H., Lilley, M.D., Hamelin, C.,Bernasconi, S. M., Okland, I.E. and Pedersen, R.B. 2016. Fluid composition of the sediment-influenced Loki's Castle vent field at the ultra-slow spreading Arctic Mid-Ocean Ridge. Geochimica and Cosmochimica Acta, v. 187, p 156 - 178. https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.05.017

Bjerga, A., Stubseid, H. H., Pedersen, L.-E. R., & Pedersen, R. B. 2022. Radiation damage allows identification of truly inherited zircon. Communications Earth & Environment, 3(1), 1-7.

Blischke, A., Brandsdóttir, B., Stoker, M.S., Gaina, C., Erlendsson, Ö., Tegner, C., Haldórsson, S.A., Helgaóttir, H.M., Gautason, B., Planke, S., Koppers, A.A.p. and Hopper, J.R. 2022. Seismic Volcanstratigraphy: The Key to Resolving the Jan Mayen Microcontinent and Iceland Plateau Rift Evolution. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 23, e2021GC009948. https://doi.org/10.1029/2021GC009948

Brekke, H.2000. The tectonic evolution of the Nowegian Sea Continental Margin with emphasisi on the Vøring and Møre Basins. In: Nøttvedt, A., Larsen, B.T., Gabrielsen, R.H., Olaussen, S., Brekke, H., Tørudbakken, B., Birkeland, Ø. and Skogseid, J. (eds): Dynamics of the Norwegian Margin. GSL Special Publication, 167, p 327 - 378.

Canales, J.P., Sohn, R.A. and deMartin, B.J. 2007. Crustal structure of the Trans-Atlantic Geotraverse (TAG) segment (Mid-Atlantic Ridge, 26_100N): Implications for the nature of hydrothermal circulation and detachment faulting at slow spreading ridges. Geochem. Geophys. Geosyst., 8, Q08004, doi:10.1029/2007GC001629.

Cherkashov, G., Poroshina, I., Tepanova, T., Ivanov, V., Bel’tenev, B., Lazareva, L., Rozhdestvenskaya, I., Samovarov, M., Shilov, V., Glasby, G.P., Fouquet, Y., and Kuznetsov, V. 2010. Seafloor Massive Sulfides from the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge: New Discoveries and Perspectives. Marine Georesources & Geotechnology, v. 28, Issue 3, pp 222 – 239.

Cherkashov, G., Kuznetsov, V., Kuksa, K., Tabuns, E., Maksimov, F., and Bel'tenev, V. 2017. Sulfide geochronology along the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge. Ore Geology Reviews, p 147 - 154. http://dx.doi.org/10.1016/j.orgeorev.2016.10.015

DMF - Direktoratet for mineralforvaltning med Bergmesteren for Svalbard 2022. Mineralstatistikk 2021, Harde fakta om mineralnæringen 2021. Tilgjengelig fra: https://dirmin.no/harde-fakta-om-mineralnaeringen-mineralstatistikk-2021 (Hentet: 24. januar 2023).

Dauteuil, O. and Brun, J.-P. 1996. Deformation partitioning in a slow spreqding ridge undergoing oblique extension: Mohns Ridge, Norwegian Sea. Tectonics, vol. 15, no. 4, p 870 - 884.

Dumais, M.A., Gernigon, L., Olesen, O., Johansen, S. E., and Brönner, M., 2021. New interpretation of the spreading evolution of the Knipovich Ridge derived from aeromagnetic data, Geophysical Journal International, Volume 224, Issue 2, February 2021, Pages 1422–1428.

European Commission 2020a. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability, Brussels, 3.9.2020 COM(2020) 474 final. Tilgjengelig fra: https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42849.

European Commission 2020b. Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study, 2020. Tilgjengelig fra: https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881.

Faleide, J.I., Tsikalas, F., Breivik, A., Mjelde, R., Ritzmann, O., Engen, Ø., Wilson, J., and Eldholm, O., 2008. Structure and evolution of the continental margin off Norway and Barents Sea, Episodes, 31, 82–91.

Firstova, A., Stepanova, T., Cherkashov, G., Goncharov, A. and Babaeva, S. 2016. Composition and Formation of Gabbro-Peridotite Hosted Seafloor Massive Sulfide Deposits from the Ashadze-1 Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge. Minerals 2016, 6, 19; doi:10.3390/min6010019 . www.mdpi.com/journal/minerals

Flesland, K., Haflidason, H., Thorseth, I.H. and Pedersen, R.B. Manganese-enriched sediment layers at the Mohns Ridge, Norwegian-Greenland Sea (in prep)

Franklin, J.M., Gibson, H.L., Jonasson, I.R. and Galley, A.G. 2005. Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology 100th Anniversary Volume pp. 523–560.

Gernigon, L., Franke, D., Geoffroy, L., Schiffer, C., Foulger, G.R. and Stoker, M., 2020. Crustal fragmentation, magmatism, and the diachronous opening of the Norwegian-Greenland Sea. Earth Sci. Rev.

Gernigon, L., Blischke, A., Nasuti, A. and Sand, M. 2015. Conjugate volcanic rifted margins, seafloor spreading, and microcontinent: Insights from nes high-resolution areromagnetic surveyes in the Norway Basin. Tectonics, 34, pp 27. https;//doi.org/10.1002/2014TC003717

Gielen, D. and M. Lyons 2022. Critical materials for the energy transition: Rare earth elements, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Gilje, S., Thorseth I.H., Pedersen R.B. Composition and characteristics of the ferromanganese crusts from the Norwegian-Greenland Sea, (in prep).

Gusev, E.A. 2015. Some features of the geological structure of the Greenland-Spitsbergen Plateau. Advances in current natural sciences, no. 1, 2015 (in Russian). VNIIOkeangeologia, St. Petersburg, p 29 - 32.

Gvein, Ø., Rui, I.J., Dahl, R.M. 2022. Bergverksdrift i Norge i Store norske leksikon på snl.no. Tilgjengelig fra: https://snl.no/Bergverksdrift_i_Norge (Hentet 12. desember 2022).

Haneda, Y., Okada, M., Suganuma, Y. and Kitamura, T. 2020. A full sequence of the Matuyama-Bruhnes geomagnetic reversal in the Chiba composite section, Central Japan. Progress in <earth Planetary Science, 7:44, pp 22. https://doi.org/10.1186/s40645-020-00354-y

Hannington, M.D., Jamieson, J., Monecke, T. and Petersen, S. 2010. Modern Sea-Floor Massive Sulfides and Base Metal Resources: Toward an Estimate of Global Sea-Floor Massive Sulfide Potential. Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication 15, pp. 317–338

Hannington, M.D., Galley, A.G, Herzig, P.M. and Petersen, S. 1998. Comparison of the TAG Mound and Stockwork Complex eith Cyprus-Type Massive Sulfide Deposits. In: Herzig, P. M., Humphris, S.E., Miller, D.J., and Zierenberg, R.A. (Eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 158, pp 389-415.

Hein, J.R., Koschinsky, A., Bau, M., Manheim, F.T., Kang, J.-K. and Roberts, L., 2000. Cobaltrich ferromanganese crusts in the Pacific. In: Cronan, D.S. (Ed.), Handbook of Marine Minerals Deposit. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 239–279

Heldal, T., Erichsen, E., Aasly, K. A., Schiellerup, H. og Raaness, A. 2017. Mineralske ressurser i bakken - oversikt og analyser 2016. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: https://www.ngu.no/publikasjon/mineralske-ressurser-i-bakken-oversikt-og-analyser-2016 (Hentet 24. januar 2023).

Hellevang, B., and Pedersen, R. B., 2005. Magmatic segmentation of the northern Knipovich Ridge: Evidence for high-pressure fractionation at an ultraslow spreading ridge. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 6(9).

Hjartarson, A., Erlendsson, Ö. and Blischke, A. 2017. The Greenland-Iceland-Faroe Ridge Complex. In: Péron-Pinvidic, G., Hopper, J.R., Stoker, M.S., Gaina, C., Doornenbal, J.C., Funck, T. and Árting, U.E. 2017. GSL, Special Publication, 447, p 127 - 148.

Kandilarov, A., Mjelde, R., Pedersen, R. B., Hellevang, B., Papenberg, C., Petersen, C. J., Planert, L., and Flueh, E., 2012. The northern boundary of the Jan Mayen microcontinent, North Atlantic determined from ocean bottom seismic, multichannel seismic, and gravity data. Marine Geophysical Research, 33(1), 55-76.

KU Leuven 2022. Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge, 117 s. Tilgjengelig fra: https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf (Hentet 21. juni 2022).

Lipton, I.T., Jankowski, P.E., Munro, P. and Lowe, J.J. 2012. Mineral Resource Estimate, Solwara Project, Bismarck Sea, PNG. Golder Associates Report No SL01-NSG-RPT-7020-001 Rev 1., Nautilus Minerals Nuigini Limited Report 10631040-003-R-Rev 1., 217 p.

MMTA - Minor Metals Trade Association 2023. Minor Metals. Tilgjengelig fra: https://mmta.co.uk/metals/ (Hentet 17. januar 2023).

Monecke, T., Petersen, S. and Hannington, M.D. 2014. Constraints on water depth of massive sulfide formattion: Evidence from modern seafloor hydrothermal systems in arc-related settings. Economic Geology, vol. 109, No. 8, p 2079 - 2101.

Mosar, J., Eide, E.A., Osmundsen, P.T., Sommaruga, A. and Torsvik, T.H., 2002. Greenland - Norway separation: a geodynamic model for the North Atlantic. Nor. J. Geol. 82 (4), 281–298.

Nemčok, M., Sinha, S.T., Doré, A.G., Lundin, E.R., Mascle, J., and Rybár, S., 2016. Mechanisms of microcontinent release associated with wrenching-involved continental break-up; a review, Geol. Soc., London, Spec. Publ., 431, 323.

NGU - Norges geologiske undersøkelse 2023. Mineralressurser - Metaller. Tilgjengelig fra: https://www.ngu.no/emne/metaller (Hentet: 24. januar 2023).

Olesen, O., Brönner, M., Ebbing, J. and Koziel, J. 2010. New aeromagnetic and gravity cpmpliations from Norway and adjacent areas: Methods and applications. Petroleum Geology Conferences series 2010; v.7, p 559 - 586. doi:10.1144/0070559

Oljedirektoratet 2018. Klassifisering av petroleumsressursene på norsk kontinentalsokkel - Oljedirektoratets ressursklassifikasjonssystem 2016. Tilgjengelig fra: https://www.npd.no/regelverk/veiledninger/ (Hentet: 23. januar 2023).

Pedersen, R. B., Thorseth, I. H., Olson, E. J., Hellevang, H., Okland, I., Baumberger, T., Lilley, M. D., Bruvoll, V., Mjelde, R., & Haflidason, H. (2007). Hydrothermal activity and core complex formation at the Arctic Mid?Ocean Ridge: An overview of preliminary results of the H2DEEP expedition to the southern Knipovich Ridge at 73N. Amercian Geophysical Union, Fall Meeting 2007, Abstract #OS41C-05, 5–7.

Pedersen, R.B., Thorseth, I.H., Nygård, T.E., Liley, M.D and Kelley, D.S. 2010 a. Hydrothermal Activity at the Arctic Mid-Ocean Ridges. In: Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges. Gephysical Monograph Series 188. American Geophysical Union, p 67 - 89. DOI: 10.1029/2008GM000783.

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. and Jørgensen, S.L. 2010 b. Discovery of a black smoker vent field and vent fauna at the Arctic Mid-Ocean Ridge. Nature Communications, 1:106, p 1 - 6.DOI: 10.1038/ncomms1124

Pedersen, R.B, B.R. Olsen, T. Barreyre, A. Bjerga, A. Denny, M. Heggernes Eilertsen, I. Fer, H. Haflidason, J. Thomassen Hestetun, S Jørgensen, P.A. Ribeiro, I.H. Steen, H. Stubseid, A.H. S. Tandberg and I. Thorseth, 2021. Fagutredning mineralressurser i Norskehavet. Landskapstrekk, naturtyper og bentiske økosystemer. Rapport fra senter for dyphavsforskning, Universitetet i Bergen.

Polteau, S., Planke, S., Zastrozhnov, D., Abdelmalak, M. M., Lebedeva-Ivanova, N., Planke, E. E., Svendsen, H. H., Mazzini, A., Gernigon, L., Myklebust, R., Kjølhamar, B. E., Pedersen, R. B., Sandstå, N. R. and Bünz, S., 2020. Upper cretaceous-paleogene stratigraphy and development of 49 the Mímir High, Vøring transform margin, Norwegian Sea. Marine and Petroleum Geology, 122.

Reimers, H. 2020. Identifying oceanic core complexes and associated detachment faulting on the ultraslow-spreading Mohns Ridge and links to SMS-deposits. Mineralproduksjon, No 9, Norsk bergforening, ISSN 1893-1170 (online edition) ISSN 1893-1057 (printed edition), p. A25 - A53.

Sahlström, F., Palinkaš, S. S., Dundas, S. H., Sendula, E., Cheng, Y., Wold, M., & Pedersen, R. B. (2022). Mineralogical distribution and genetic aspects of cobalt at the active Fåvne and Loki's Castle seafloor massive sulfide deposits, Arctic Mid-Ocean Ridges. Ore Geology Reviews, 105261

Snook, B., Drivenes, K., Rollinson, G.K. and Aasly, K. 2018. Characterisation of mineralized Materialfrom the Loki's Castle hydrothermal vent on the Mohn's Ridge. Minerals, 8, 576; doi:10.3390/min8120576

Stensland, A., Baumberger, T., Mork, K.A., Lilley, M.D., Thorseth, I.H. and Pedersen, R.B. 2019. 3He along the ultraslow spreading AMOR in the Norwegian-Greenland Seas. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 147, 1-11.

Stubseid, H., Bjerga, A., Halfidason, H., Pedersen, R.B., 2023. Volcanic evolution of an ultraslow-spreading ridge (in review). Preprint: https://www.researchsquare.com/article/rs-2393567/v1

Styve, E., 2015. Petrogenesis of igneous samples from the Gjallar Ridge and the Vøring Spur. Master thesis, Department of Earth Science, University of Bergen

Sudarikov, S., Narevsky, E. and Petrov, V. 2021. Identification of Two New Hydrothermal Fields and Sulfide Deposits on the Mid-Atlantic Ridge as a Result of the Combined Use of Exploration Methods: Methane Detection, Water Column Chemistry, Ore Sample Analysis, and Camera Surveys. Minerals 2021, 11, 726. https://doi.org/10.3390/min11070726

Talwani, M., Eldholm, O., 1977. Evolution of the Norwegian–Greenland Sea, Bull. geol. Soc. Am., 88, 969–999.

Torsvik, T., Amundsen H.E.F., Trønnes, R.G., Doubrovine, P.V.,Gaina, C., Kuznir, N.J., Steinberger, B., Corfu, F., Lewis, D.A., Griffin, W.L., Wemer, S.C. and Jamtveit, B. 2015. Continental crust bebeath southeast Iceland. PNAS, pp 10. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1423099112

U.S. Geological Survey 2022. Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 202 p., https://doi.org/10.3133/mcs2022.

Vorren, T. O., Laberg, J. S., Blaume, F., Dowdeswell, J. A., Kenyon, N. H., Mienert, J., Rumohr, J., and Werner, F., 1998. The Norwegian–Greenland Sea continental margins: morphology and late Quaternary sedimentary processes and environment. Quaternary Science Reviews, 17(1-3), 273- 302.

Wessel, P., Müller, R.D. 2018. Published Magnetic Picks for Tectonic Reconstruction. Site: www.soest.hawaii.edu./PT/GSFML/index.html

Wold, M., 2022. Geochemical characterization of the Gnitahei seafloor massive sulfide deposit, Arctic Mid-Ocean Ridge, Master thesis, Department of Eart Science, University of Bergen

Zayonchek, A., Brekke, H., Leonov, J., Sokolov, S., Khytorskoy, M., Lundschien, B.A., Høy, T. and Stenløkk, J. 2011. Norwegian-Russian joint investigations around Svalbard and Franz Josef Land – evidence of a plate boundary in the making? Abstract, Sixth International Conference on Arctic Margins (ICAM VI).