

# KAPITEL 22



**FIGUR 181.** Detaljeret prøvetagning af mineraliseret zone. Zonen har tydeligvis jernsulfider, som i overfladen er omdannet til rustmineraller og svovl (lysegul farve), men måske også andre metaller? Foto af Guy Della Valle.



# MINERALEFTERFORSKNING

## MINERALEFTERFORSKNING

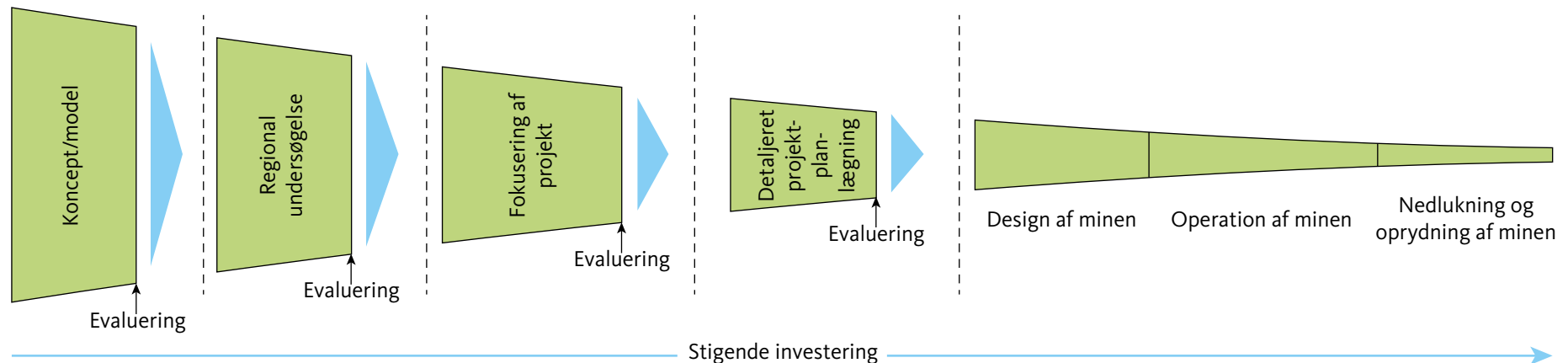
Mineralefterforskning er geologiske undersøgelser, som har til formål at lokalisere mineralske råstoffer, som findes i tilstrækkelige mængder til, at det vil være økonomisk rentabelt at udvinde dem i en mine. Tidligere miner har ofte udvundet de forekomster, som var lette at finde og bryde, fordi de lå tæt på eller i overfladen. Efterhånden som disse let tilgængelige forekomster er ved at være brugt op, er det nødvendigt at finde forekomster, som er sværere tilgængelige, fx i Arktis eller forekomster som befinder sig dybt under jordoverfladen. Derfor er de fore-

komster, der skal blive til nye miner, sværere at finde og kræver nye innovative efterforskningsmetoder.

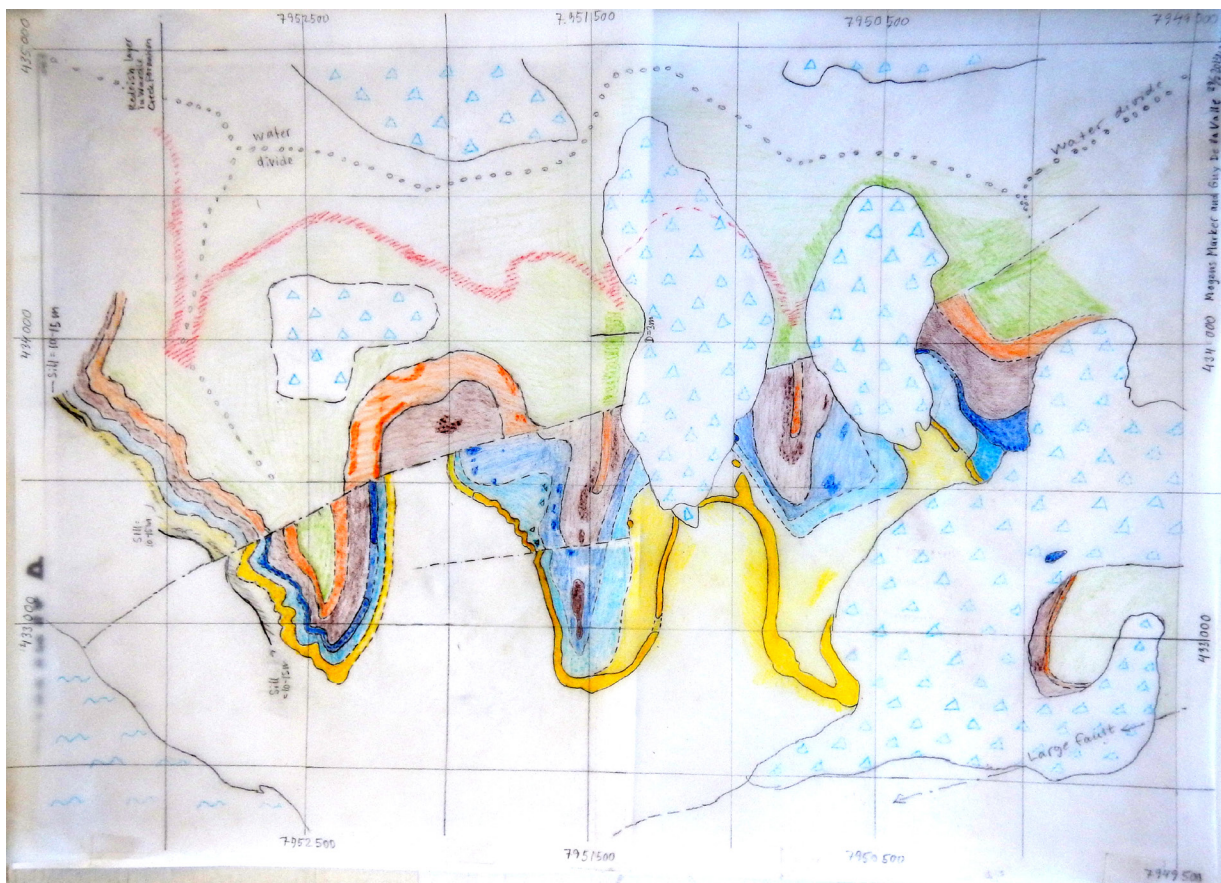
Mineralefterforskning er en proces, som foregår trinvist, og hvor hvert trin kræver større og større investeringer. Derfor evalueres der efter hvert trin, om der er tilstrækkeligt med positive indikationer på en økonomisk interessant forekomst, inden mineselskabet beslutter at fortsætte eller stoppe (figur 182). Som led i sådanne vurderinger forsøger mineselskaberne at beregne, hvor store mængder der er af de mineraler, de leder efter, det opgøres både i volumen

og masse, og kvaliteten omtales som lødighed. Lødigheden er et mål for, hvor mange procent af råstoffet/metallet, der er i 1 ton af bjergarten.

Et efterforskningsprojekt starter med, at en geolog, almindeligvis fra et mineselskab eller et af de selskaber der er specialiseret i den tidlige mineralefterforskning, får en idé om, at et bestemt mineral kunne være opkoncentreret i et givent område. Denne idé kan være kommet på grund af geologens viden om, hvilke råstoffer der er knyttet til bestemte geologiske miljøer, eller måske har man geofysiske eller geokemiske data, som peger



**FIGUR 182.** Fra idé til mine. Der ligger en lang række trin før en mine kan åbne. Hvert trin er mere og mere kostbart, og der er mange steder projektet kan lukkes ned undervejs. Af MiMa (2019).



**FIGUR 183.** Der er fundet en mineralisering med kobber på et sted i de bjergarter, der har en orange signatur på kortet. Geologerne tegner et detaljeret geologisk kort for at finde ud af, hvor man ellers kan finde den orange bjergart og volumen af den. Efter Avannaa Resources Ltd. (2012).

på, at der kunne være en mineralforekomst. Yderligere kan der måske være fundet tegn på mineralisering i området.

Desuden er gode geologiske kort og basisdata afgørende for, at mineselskaberne har et godt udgangspunkt for deres efterforskning og for de gode idéer. I den vestlige verden er det som regel en national geologisk institution, som leverer basisdata, mens selve efterforskningen som regel udføres af private selskaber. Basisdata er både topografiske, geologiske, geokemiske og geofysiske kort.

På basis af data udarbejdes geologiske modeller, som bruges til at planlægge, hvordan mineralefterforskningen skal gennemføres. Det kan fx omfatte en regional undersøgelse af området med både geokemiske og geofysiske metoder. Hvis der kommer positive indikationer fra disse undersøgelser, vil undersøgelserne kunne indsnævres og koncentrerer til områder, hvor de regionale undersøgelser var særligt lovende. Der kunne indgå detaljeret prøvetagning fra mineraliserede bjergarter og detaljeret geofysik i de udvalgte områder. Detaljeret geofysik vil ofte udføres ved målinger foretaget på landjorden til fods eller fra køretøjer. Her vil



**FIGUR 184.** Efterforskning i billeder.

**A.** Nogle gange får man brug for at tage store prøver. Så må man få det nødvendige udstyr fragtet ud; her til en lille ø i Diskobugten i Vestgrønland.

**B.** Prøvetagning af bæksediment.

**C.** Jordprøvetagning.

**D.** Tydelige tegn på kobbermineralisering. Mineralerne azurit (blå) og malakit (grøn) dannes, når kobber udsættes for vejr og vind. Geologen skal nu finde ud af, hvor kilden til bjergarterne i bækken er.

**E.** Undersøgelser med transportabel XRF, som ved hjælp af røntgenstråling kan måle, hvilke grundstoffer en bjergart indeholder. Kobberef-terforskning i Nordøstgrønland.

**F.** Geoelektrisk undersøgelse fra helikopter.

Fotos A, C, D og E af Matilde Rink Jørgensen, B af Tim Rödel og F af SkyTEM (u.å.).



geologer ofte være til stede i det interessante område for at indsamle data, prøvetage og vurdere bjergarterne. Måske arbejder de videre på de eksisterende geologiske kort og tilføjer nye detaljer (figur 183). Nu kan selskabet igen vurdere, om projektet stadig ser lovende ud. Det næste trin kan være, at selskabet vælger at foretage borer, så de kan tjekke, om deres modeller over undergrunden er rigtige. De kan få prøver af mineralerne til undersøgelse, og borerne kan også bruges til at give geologerne en idé om, hvor stort et mineraliseret legeme (tredimensionelt område), der er tale om. Hvis resultaterne stadig er positive, vil der skulle laves et endnu tættere netværk af borehuller, så man kan lave en egentlig tredimensionel model af det mineraliserede legeme. Det gælder om at tage tilstrækkeligt mange og store prøver til at få et præcist billede af, hvor høj lødigheden i malmen er, dvs. hvor meget metal, der findes pr. ton malm (figur 184. a).

Hvis geologerne har været heldige og er nået frem til, at der er en stor mineralforekomst med en høj lødighed, træder mineingeniørerne til. De beregner, hvordan man bedst bryder malmen: Skal det være i en åben eller en underjordisk mine? Hvordan

skal mineralerne komme ud af bjergarten, og hvordan trækkes grundstofferne ud af disse mineraler? Hvor mange år vil det tage at bryde malmen? Når disse forhold er afklaret, beregner økonomer, om det kan betale sig at etablere minen. Hvis mineselskabets beregninger viser, at det vil være økonomisk rentabelt at etablere en mine, vil ressourcen tilhøre gruppen af påviste og økonomiske ressourcer, også kaldet reserven. Hvis beregninger viser, at det ikke vil være muligt at drive minen med økonomisk overskud, vil ressourcen tilhøre kategorien påvist ressource, som er ikke-økonomisk. Denne type projekter vil ofte genoptages senere, hvis prisen på råstoffet stiger, eller man har fået nye idéer til, hvordan man kan videreudvikle projektet.

Hvert trin i processen kræver stadig større investeringer, og efterforskningsselskabet vil som regel skulle bruge meget energi på at overbevise investorer om værdien af deres projekt, før man går videre til næste trin i projektet. Langt de fleste projekter må lukkes ned et sted mellem idé og mine, da det ofte viser sig, at forudsætningerne for at åbne en mine ikke er til stede. For at en produktion går i gang, skal følgende være

opfyldt:

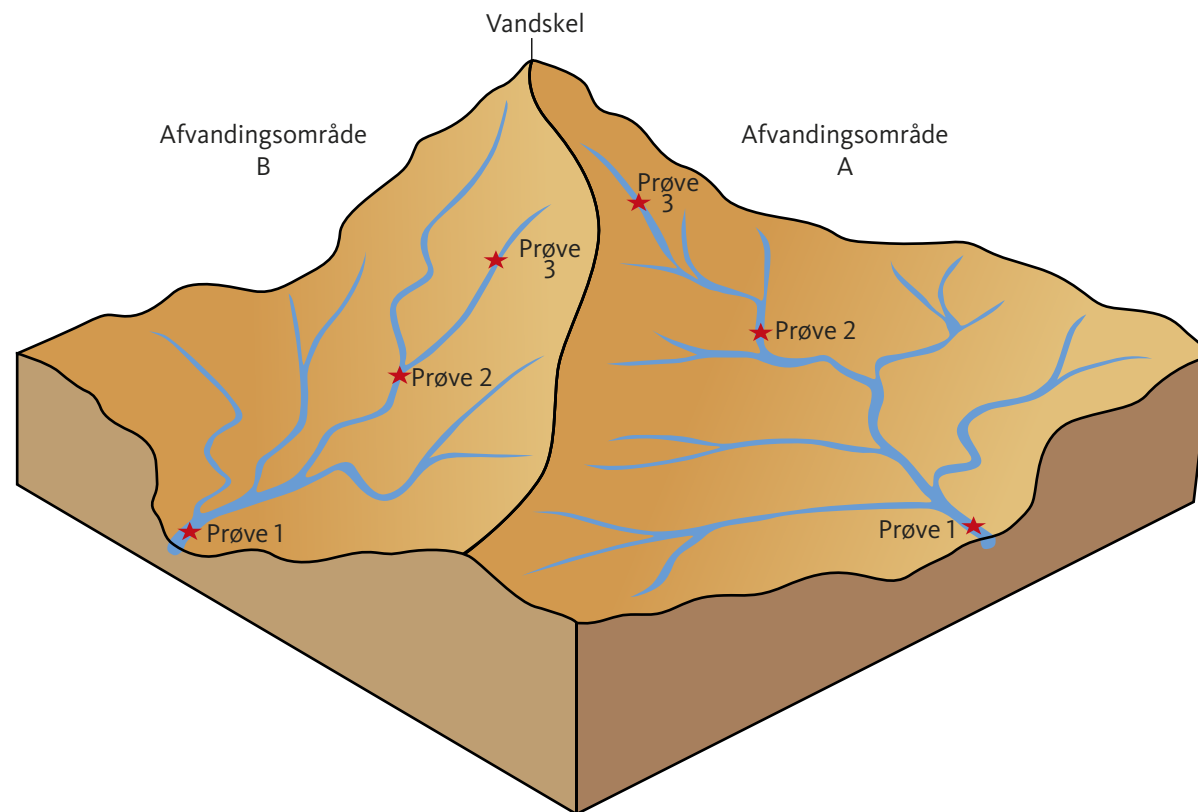
1. Malmreserven skal være tilstrækkelig stor, til at mineselskabet vil kunne tjene nok penge til at dække omkostningerne til at anlægge minen og til at give investorerne forrentning af deres investering.
2. Det skal være teknologisk muligt og økonomisk rentabelt at bryde og opkoncentrere det ønskede mineral.
3. Offentlige myndigheder skal have godkendt mineselskabets produktionsplaner, udstedt tilladelse til at bryde malmen (minelicens), givet miljøgodkendelser, godkendt nedlukningsplan mv.
4. Der skal være investorer, som vil finansiere opbygningen af minen og infrastrukturen (ofte milliardinvesteringer).
5. Mineselskabet skal have vished for, at der er aftagere til deres mineralkoncentrater.
6. Licenser med aftaler mellem myndigheder og mineselskaber om udnyttelse af mineralressourcer.

Efterforskningsselskaber eller mineselskaber må kun foretage deres undersøgelser i felten med myndighedernes tilladelse. Sådanne til-

ladelser, eller licenser, regulerer både rettigheder og selskabets forpligtelser. Licenserne er en slags gensidig overenskomst mellem ejeren af jorden, ofte staten, på den ene side, og investoren, selskabet, på den anden side. Overenskomsten vil altid indeholde formuleringer om, at selskabet har eneret til området, og at ejeren får del i overskuddet, hvis der bliver etableret en mine. Herudover indgår krav i forhold til miljø og til relationer med det omgivende samfund. Der kan fx være krav om, at minen skal bruge lokal arbejdskraft. Inden et selskab får endelig godkendelse til at etablere en mine, gennemgår myndighederne dets planer for, hvordan minen skal udformes, hvordan tailings (restprodukter) skal håndteres, hvordan malmen skal udskibes m.m. Lovgivningen på området varierer fra land til land.

### GEOKEMISKE EFTERFORSKNINGSMETODER

En klassisk metode til at finde områder af særlig interesse for efterforskning er systematisk prøvetagning af sedimenter i vandløb, der afvander et stort område, og derefter lave en geokemisk analyse af indholdet af forskellige grundstoffer. Princippet er, at ethvert vandløb afvander et såkaldt



**FIGUR 185.** Bæksedimenter samles langs vandløb, jo længere opstrøms man finder en anomali af et mineral, jo tættere er man på kilden til mineralet. Af MiMa (2019).

afvandingsområde, som er afgrænset af et vandskel (figur 185). Alt det overfladeafløb, som sker i et givent vandskel vil ende i et vandløb. Vandet fører de mineraler, der er eroderet fri af bjergarterne i området, med sig, og dermed kan mineraler fra eventuelle mineraliseringer findes i et vandløb.

Geologerne vil gå efter mineraler med høj densitet, fx guld, som vil have en tendens til at ophobe sig i områder med lavere energi i vandløbet.

Efterhånden som de instrumenter, der bruges til kemiske analyser af geologiske prøver,



bliver bedre og bedre, kan selv meget små koncentrationer af et grundstof registreres. Det har ført til, at geologer ikke kun ser på geologisk materiale, men også på fx plante-materiale i et område. Planterne vil have optaget små mængder af ioner fra eventuelle mineralforekomster, og analyser af planterne vil så kunne udpege anomalier. Anomalier er områder, der er udenfor det normale og vil i dette tilfælde bruges om områder med forhøjet indhold af det metal, som der ledes efter. I Canada har efterforskningsselskabers geologer fx fløjet rundt i helikopter og taget prøver af toppen af høje grantræer og målt guldindholdet i disse. Andre metoder kan måle meget små koncentrationer af metalioner fra malmforekomster, der ligger flere kilometer nede i jorden. Denne metode bygger på, at metaller danner ioner, som på grund af deres elektriske ladninger langsomt vandrer gennem jordlagene, der er meget svagt bundet til mineral-kornene i overfladen. Hvis prøver taget i overfladen vaskes med en svag syre, kan indholdet af disse metalioner måles med fintfølende instrumenter og eventuelt indikere, om der kan være dybtliggende mineralforekomster (figur 184. e).

## GEOFYSISKE METODER

Geofysiske metoder bruges til at se ned i undergrunden med instrumenter, som kan måle fysiske egenskaber ved bjergarter. Metoderne magnetik, elektrisk ledningsevne, densitet, seismik og remote sensing er nogle af metoderne.

Mange geofysiske undersøgelser kan laves regionalt fra fly eller helikopter (figur 184. f). På denne måde kan man få et overblik og se nogle trends (figur 187). Skal undersøgelserne være mere detaljerede, er det nødvendigt at lave de geofysiske undersøgelser fra land-jorden (figur 186. a).

Geofysiske resultater afbildes som regel på kort, så informationer kan sammenholdes med topografi, geologi og tilstedeværelsen af fx bygninger eller andre menneskeskabte konstruktioner, som kan påvirke resultaterne. Ud fra geofysiske kort kan dygtige geofysikere fx aflæse, om der findes forkastninger eller lag i undergrunden (figur 187).

## MAGNETISKE UNDERSØGELSER

Der findes en række almindelige mineraler (de fleste er jernholdige, fx magnetit), som

er magnetiske, hvilket man med særlige instrumenter kan måle i ned til 10 km's dybde. Ved en magnetisk kortlægning måles variationer i bjergarternes magnetik. Til større regionale undersøgelser monteres instrumentet på et fly eller en helikopter, som overflyver et område i tætte linjer, hvorefter data kan sammenstilles til et kort, der viser anomalier i magnetisk intensitet. Et magnetisk kort kan afsløre tilstedeværelsen af jernmineraler (figur 187) og nikkel, samt nogle af de bjergarter der kan indeholde diamanter. Magnetiske data kan også vise, om der er en forkastning, som adskiller to bjergarter med forskellig magnetik fra hinanden langs en skarp linje.

## GEOELEKTRISKE UNDERSØGELSER

Ved en geoelektrisk undersøgelse måles bjergarternes elektriske modstand. Forskellige mineraler har forskellig evne til at lede elektricitet, men der er også stor variation i ledningsevnen afhængigt af krystalstrukturen, om bjergarten er meget porøs, eller om den er opbrudt. Men generelt kan man sige, at en bjergart med et højt indhold af metal-liske mineraler vil have mindre modstand end de fleste andre bjergarter. En af egenskaberne ved metaller er, at de er elektrisk

**FIGUR 186.** Boring i billeder.

**A.** Geofysiker laver magnetiske undersøgelser over et område som skal bores. Personen går med instrumentet hen over det interessante område. Denne viden bruges til at bestemme, hvor der skal bores.

**B.** Borekerne af diamantholdig lamprofyr tages ud af borerøret. Undersøgelse af en diamantforekomst på øen Qeqertaa i Diskobugten, Vestgrønland.

**C.** Boremaskine, som borer kerner ud af undergrunden, er ved at gøre klar til at hejse borerøret ned i hullet.

**D.** Borekerner er lagt op og er klar til at geologerne kan beskrive dem og udtage prøver til kemiske analyser.

**E.** Kerner, der skal analyseres, skæres over på langs i en stensav. Den ene del sendes til laboratoriet, hvor den analyseres, mens den anden del bevares, så geologerne altid kan tjekke borekernen.

Fotos A af Guy Della Valle, B-E af Matilde Rink Jørgensen.





ledende, men når de indgår i mineraler med andre stoffer, vil de ikke altid bevare denne egenskab.

Geoelektriske undersøgelser er også hyppigt brugt til at finde grundvand, da en bjergart med porerum fulde af vand vil lede elektricitet bedre, end når der er luft i porerummene.

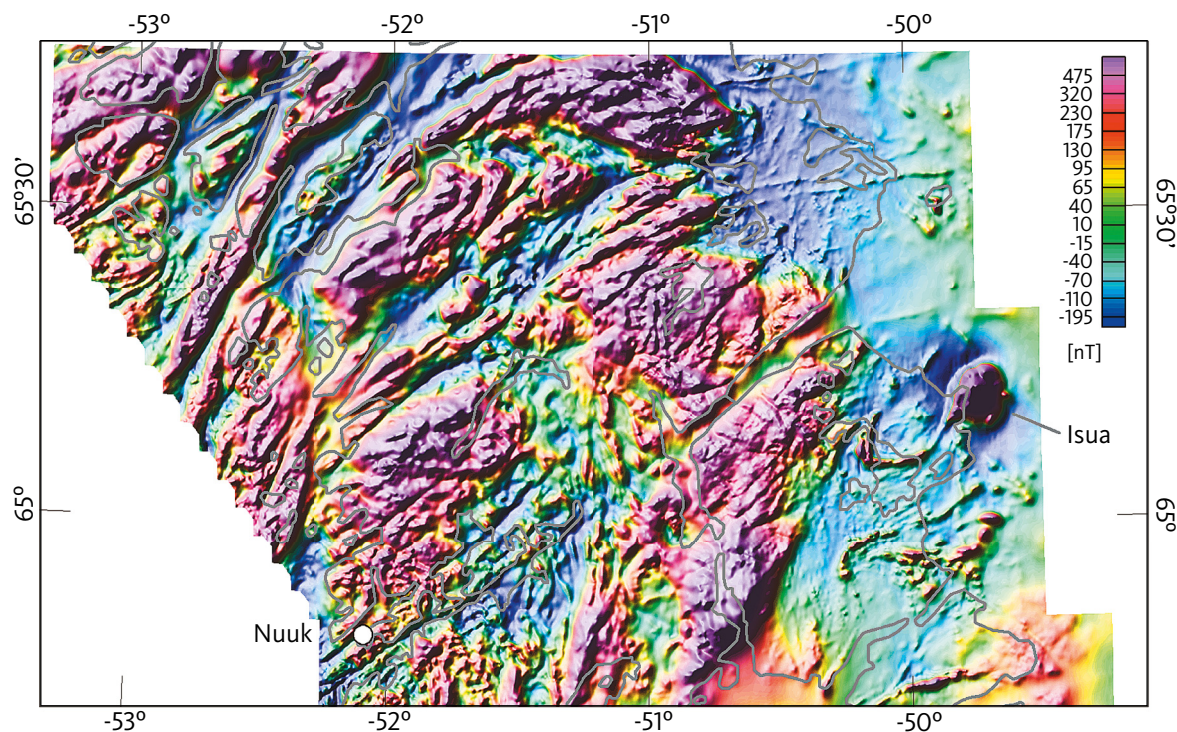
#### GRAVIMETRISKE UNDERSØGELSER

Alle masser har en tiltrækningskraft på andre masser, det vi kalder gravitation. Jo større masse, desto større gravitation. Det betyder, at bjergartslegemer med en høj densitet vil have en smule større gravitation end bjergarter med en lav densitet. Metal-liske malmbjergarter har ofte en ganske høj densitet, og man kan derfor måle deres tilstedeværelse ved hjælp af gravitation, også selvom de ligger ganske dybt i jordskorpen.

Når man foretager gravimetrisk undersøgelse, måles den relative gravitation i et område. Det gøres ved at måle, hvor meget gravitationen hvier i et lod på en lille fjeder. Gravitationen eller det, der i fysik kaldes tyngdeaccelerationen, er ved Danmarks overflade  $9,82 \text{ m/s}^2$ , og det, man kan måle i en gravimetrisk undersøgelse, er som oftest

variationer på sjette decimal.

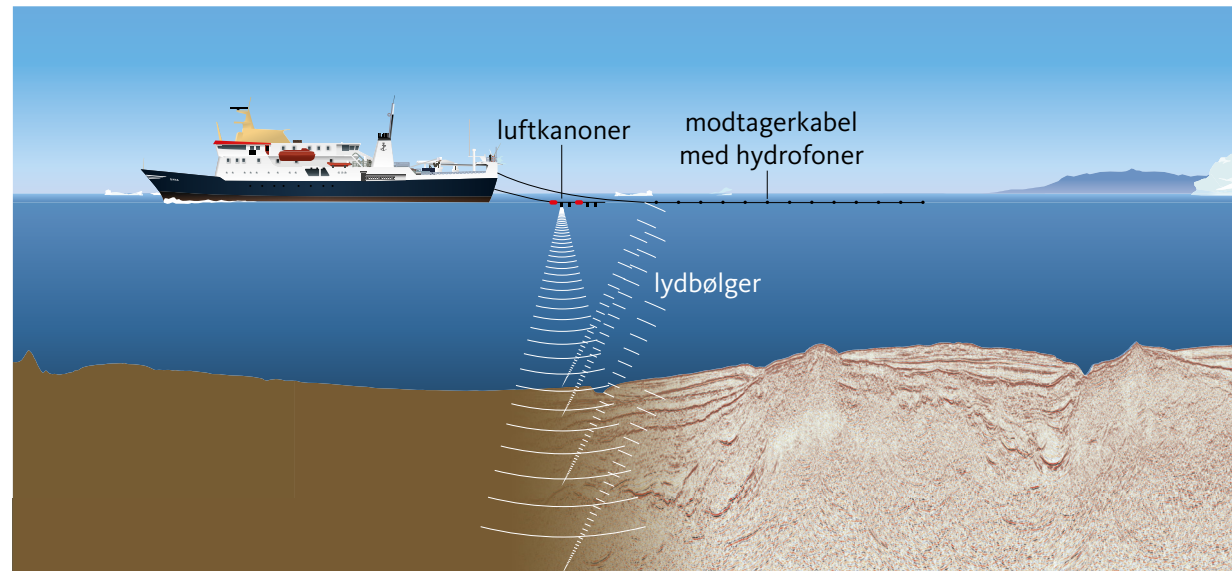
I Nordjylland findes der i undergrunden store legemer af salt, såkaldte saltdiapirer. Salt har en væsentlig lavere densitet end den gennemsnitlige densitet af jordskorpen, og gravitationen er derfor mindre over disse ca. 15 saltdiapirer.



**FIGUR 187.** Magnetisk kort. Data er indsamlet fra fly over Nuuk-området i Vestgrønland. Den bandede jernformation ved Isua står klart frem som en kraftig anomali. Af Rasmussen (2013).

## SEISMISKE UNDERSØGELSER

Seismik er et andet vigtigt værktøj til at kortlægge, hvad undergrunden består af. Metoden er meget udbredt i olieefterforskning, hvor olieselskaberne ønsker at kortlægge sedimentære lag, der ligger dybt i undergrunden. Men seismik er også hyppigt brugt i mineralefterforskning. Metoden går ud på, at man sender chokbølger, fx fra sprængladninger, ned i jorden, og jo større chok, desto dybere kan bølgerne rejse. Når bølgerne møder en grænse mellem lag af forskellig hårdhed, vil en fraktion af dem refrakteres (ændre retning), og med seismofoner vil man på overfladen kunne måle de refrakterede bølger (**figur 188**). Ved at måle tiden fra affyringen af chokbølgen til bølgens ankomst til overfladen, vil man kunne udregne dybden til de forskellige laggrænser. Jo mere viden, der er om de bjergarter bølgerne har rejst igennem, jo bedre kan dybden beregnes. Det er også ved hjælp af seismik, at Jordens indre er kortlagt. Undersøgelser af jordskælvsbølger, og hvordan de afbøjes og reflekteres, har vist, at Jorden er opdelt i en indre fast kerne, en ydre flydende kerne, en plastisk kappe og den faste skorpe.



## REMOTE SENSING-UNDERSØGELSER

Remote sensing er et udtryk, som bliver brugt om alle mulige former for dataoptagelse, hvor man fra fly eller satellit kan måle reflekteret og udsendt stråling. Modsat de andre geofysiske metoder måler denne metode ikke ned i undergrunden men på jordoverfladen. I mineralefterforskning laves optagelser af jordoverfladen typisk fra enten fly eller satellit. De kameraer, som man anvender, kan optage andre bølgelængder end de synlige, og dermed kan man lokalisere ting, som ikke kan ses med det blotte øje. For

**FIGUR 188.** Seismisk undersøgelse til havs. Til højre i billedet ses udformningen af de lag, som man ved lydbølgerne har optegnet. Af Henriksen (2005).

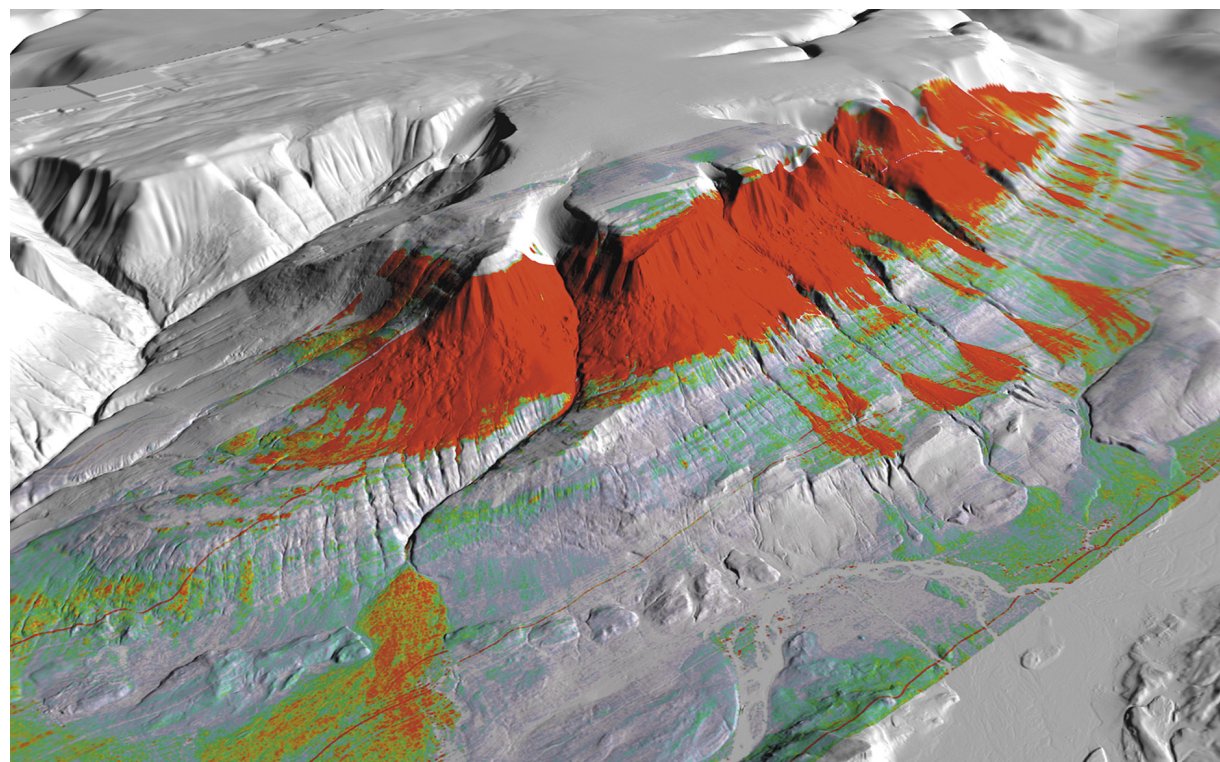


eksempel reflekterer og udsender forskellige mineraler karakteristiske bølglængder, og på den måde kan man lokalisere områder, hvor særlige mineraler findes, eller hvor mineralerne fx er omdannet. Omdannelse er et almindeligt fænomen, når en hydrotermal væske påvirker en bjergart. Hvis en bjergart, som indeholder feldspat, gennemstrømmes af en væske med lav pH, vil feldspatten omdannes til kaolin. Kaolin ser ikke ud af meget med det blotte øje, men med et kamera, der kan optage alle bølglængder, kan man optage en anomali fra kaolin (figur 189). Det der er interessant ved en omdannelseszone er, at den væske, der har omdannet bjergarten, også vil kunne bære metalioner, som muligvis kan være udfældet på et gunstigt sted i samme region.

I dag laves meget præcise højdemodeller ved hjælp af remote sensing, så landmålere ikke længere behøver gå rundt i terrænet og opmåle topografien.

#### BORINGER NED I UNDERGRUNDEN

Når efterforskningsselskaberne ikke kan tilføje mere viden til deres efterforskningsprojekt ved at tage bjergartsprøver i overfla-



den eller ved at bruge geokemiske og geofysiske metoder, og stadig ønsker mere viden, må de bore i undergrunden for at se, hvad der gemmer sig. Det er meget dyrt at lave boreprogrammer, og hvis det er i ødemarken langt fra almindelig infrastruktur, er det ekstremt dyrt. Her skal en borerig ofte skilles ad og enkeltdele flyttes med helikopter

**FIGUR 189.** Kortlægning af mineralet kaolin (angivet med rødt) med remote sensing, her draperet ovenpå en satellitbaseret højdemodel af området. Klitdal, Østgrønland. Af Riisager & Sørensen (2014).

mellem hvert borehul. Derfor skal selskabet have en velovervejet plan for, hvor der skal bores. Hvis de første boringer giver positive resultater, er det almindeligt, at selskaberne laver et større netværk af boringer, så de kan udarbejde en detaljeret model af ressourcen (legemet) og finde ud af, hvilke lødigheder man finder hvor. Selve boringen foregår med et hult borehoved, som er monteret på et rør. Når røret trækkes op, ligger der en borekerne af den bjergart, der er boret igennem, inde i borerøret (figur 186. e). Borehovedet er besat med diamanter, som skærer sig ned igennem eventuelle hårde bjergarter. Borekernen bliver kontinuerligt løftet op til overfladen i mindre stykker, så geologen, der har ansvaret for boringen, hele tiden kan følge med i, hvor dybt borehovedet befinder sig. Der føres nøje log over, hvilke geologiske lag der gennembøres (figur 186. d). Geologen beskriver kernen, og der tages prøver af kernen, som kan analyseres for dens indhold af mineraler. Man kan også foretage løbende geofysiske målinger nede i borehullet.

#### NØGLEBEGREBER

- Lødighed
- Malm
- Licens
- Geokemiske undersøgelser
- Geofysiske undersøgelser
- Magnetiske undersøgelser
- Geoelektriske undersøgelser
- Gravimetriske undersøgelser
- Seismiske undersøgelser
- Remote sensing
- Boring

#### REFERENCER

Henriksen, N. (2005). *Grønlands geologiske udvikling - fra urtid til nutid*. GEUS.

Rasmussen, T. M. (2013). Airborne geophysical surveys in Greenland. *Exploration and mining in Greenland*, (27), 1–2.

Riisager, P., & Sørensen, L. L. (2014). New airborne geophysical and remote sensing data from central East- and South-East Greenland. *Exploration and mining in Greenland*, (31), 1–2.

SkyTEM. (u.å.). TEM survey for minerals in Greenland. Hentet fra <https://skytem.com/photos/>