

GEOLOGISKE MINERALFOREKOMSTER og den grønne omstilling

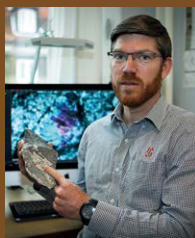
En "black smoker" på havbunden - findes typisk ved de såkaldte midtoceanrygge. De er en kilde til økonomisk interessante mineralforekomster.

Foto: MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften, Universität Bremen/CC BY 4.0 Deed



Behovet for råstoffer – især metaller – til brug i grønne teknologier kommer til at betyde mere minedrift i fremtiden. Her får du et overblik over, hvordan forskellige typer af geologiske mineralforekomster dannes.

Forfatteren



Kristoffer Szilas er lektor ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Hans forskning tager udgangspunkt i Grønlands geologiske udvikling, der spænder over 3800 millioner år. I sin forskning har han undersøgt alt fra forekomster af rubiner og guld til krom, nikkel og også industrielle mineraler som olivin og plagioklas.
krsz@ign.ku.dk

Visionen om, at menneskeheden skal frigøre sig fra brugen af fossile brændstoffer og gennemføre en "grøn omstilling" repræsenterer måske menneskehedens mest ambitiøse projekt til dato. For det indebærer en gennemgribende transformation af vores samfund på mange planer.

De hastige klimaforandringer understreger den umiddelbare nødvendighed af et skifte væk fra fossile brændstoffer. Men det er også drevet af mere strategiske interesser i at gøre energiproduktionen mindre afhængig af lande, man måske ikke sympatiserer med. Den store udfordring er at sikre en tilstrækkelig mængde sikker, prisvenlig og ren energi baseret på vedvarende energikilder. Det kan vi kun opnå gennem en effektiv og

bæredygtig udnyttelse af de nødvendige naturressourcer.

Metaller udgør fundamentet for teknologierne bag produktionen af vedvarende energi, hvad enten det drejer sig om vind- og vandkraft, solcelleanlæg, eller de metalkatalysatorer, der anvendes i fremstillingen og afbrændingen af biobrændsel.

Dermed er en forudsætning for den grønne omstilling, at vi har adgang til de nødvendige metaller, hvilket igen forudsætter minedrift. Det er en ofte overset præmis i diskussionen om fremtidens fossilfrie samfund.

Grøn omstilling kræver mere minedrift

Selvom vi konstant bliver bedre til at genbruge elektronik og genanvende metaller, kan dette alene

ikke tilfredsstillende den fremtidige efterspørgsel. For eksempel kræver elektriske køretøjer i dag i gennemsnit seks gange den mængde metaller, der bruges i konventionelle biler alene til produktionen af selve køretøjet og dets batteri. Men til elektriske biler bruges også en række metaller, der ikke er nødvendige i konventionel teknologi, for eksempel litium, nikkel, kobolt samt de sjældne jordartsmetaller. Hvis elbiler skal erstatte traditionelle benzinbiler på global skala, indebærer det nødvendigvis en udvidelse af minedriften for at få adgang til disse nye metaller.

En konkret udfordring i den sammenhæng er, at både antallet af nyopdagede mineralforekomster og deres malmkvalitet er faldende. Potentielt kan det true vores evne

til at imødekomme den stigende efterspørgsel på metaller.

Disse såkaldte kritiske metaller udvindes fra naturligt dannede mineralforekomster eller hvad geologer betegner malme.

Geologien bestemmer minepotentialet

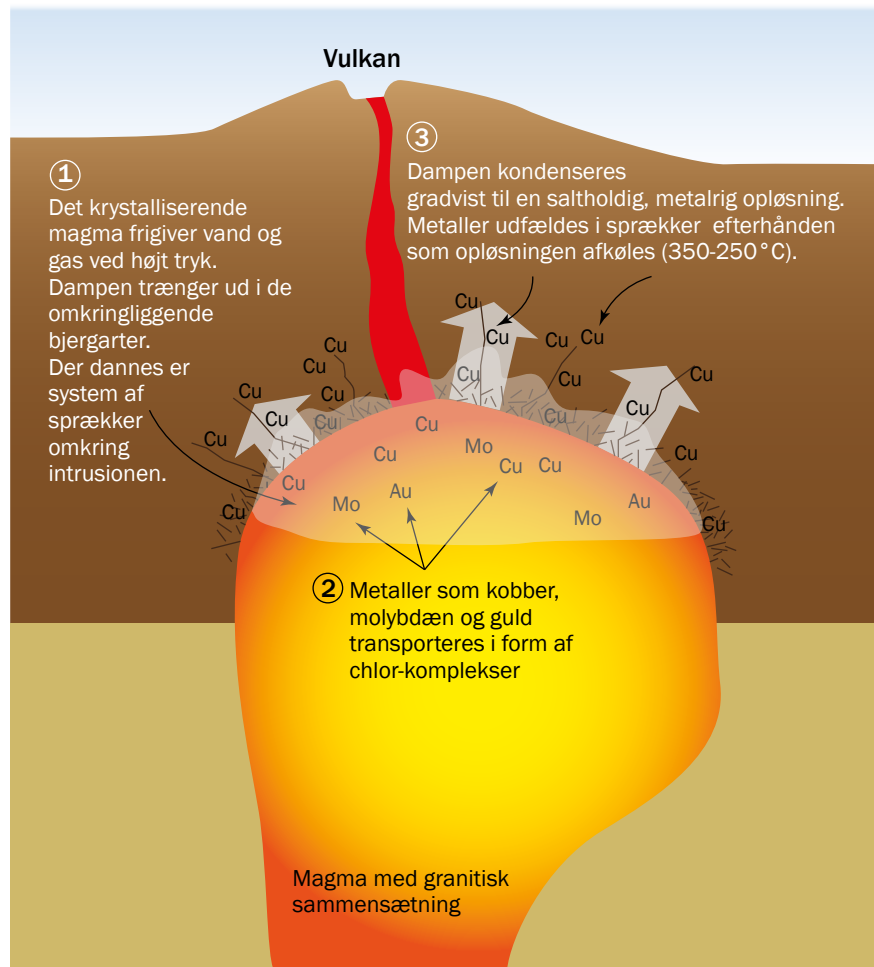
Minedrift har udgjort et fundament for vores samfund i tusinder af år. I jernalderens Danmark blev der smeltet myremalm fra omkring 500 år før vores tidsregning, og mange tusinde år tidligere var Cypren knudepunktet for de kobberforekomster, der dannede grundlaget for bronzealderen omkring Middelhavet.

Minedrift tager udgangspunkt i geologiske materialer/bjergarter, hvor koncentrationen af værdifulde metaller og/eller mineraler er så høj, at det kan betale sig at udvinde dem. Sådanne profitable mineralforekomster dannes gennem forskellige geologiske processer over tusinder eller millioner af år. Hvordan mineralforekomsterne dannes, og hvor man finder dem i dag, afhænger af en række specifikke forhold, herunder temperatur, tryk, kemisk miljø og bevægelsen af tektoniske plader.

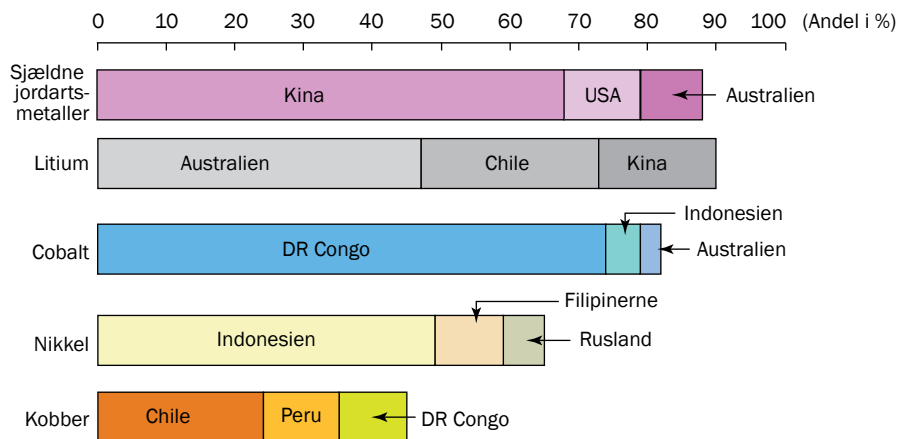
Overordnet skelner man mellem tre typer af mineralforekomster ud fra den måde, de er dannet på: (1) magmatiske forekomster, (2) hydrotermale forekomster og (3) sedimentære forekomster. I praksis vil den enkelte mineralforekomst dog være resultatet af flere forskellige processer, og der er tale om et kontinuerligt spektrum mellem disse tre overordnede typer af geologiske dannelsesmiljøer.

Typer af mineralforekomster

Magmatiske forekomster dannes ud fra magma (det vil sige smeltet stenmasse) dybt nede i Jorden. Når magma nedkøles, udkrystalliseres mineraler fra magmaen i takt med, at temperaturen kommer under disse mineralers smeltepunkt. Dette kaldes magmatisk diffe-



Figuren viser skematisk, hvordan porfyry-type kobberforekomster dannes. Når en stor mængde magma trænger op i ovenliggende bjergarter, kaldes det på fagsproget en intrusion.



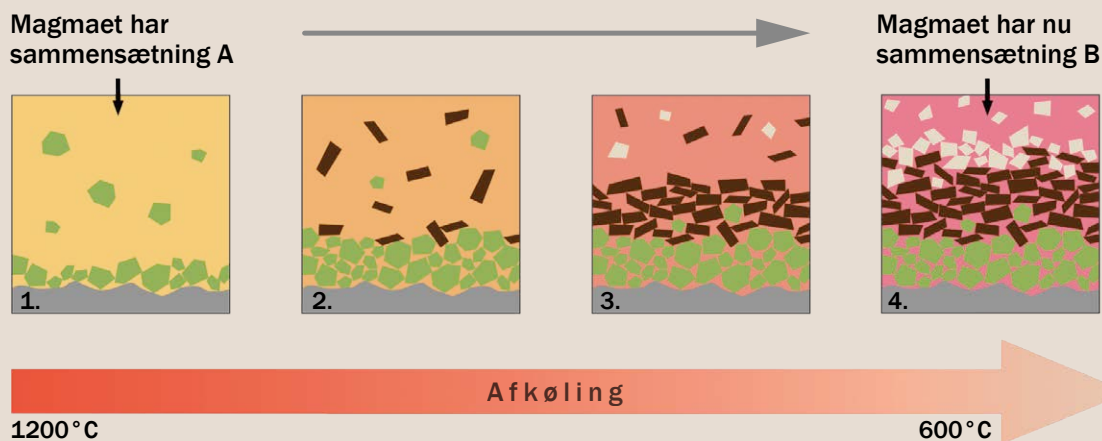
Figuren viser de tre største producenter af en række vigtige råstoffer i verden. Hvis man ser på, hvor i verden den første forarbejdning af de selvsamme råstoffer finder sted, vil Kina i alle de viste tilfælde komme ud som den største.

Kilde: IEA, Critical Minerals Market Review 2023.

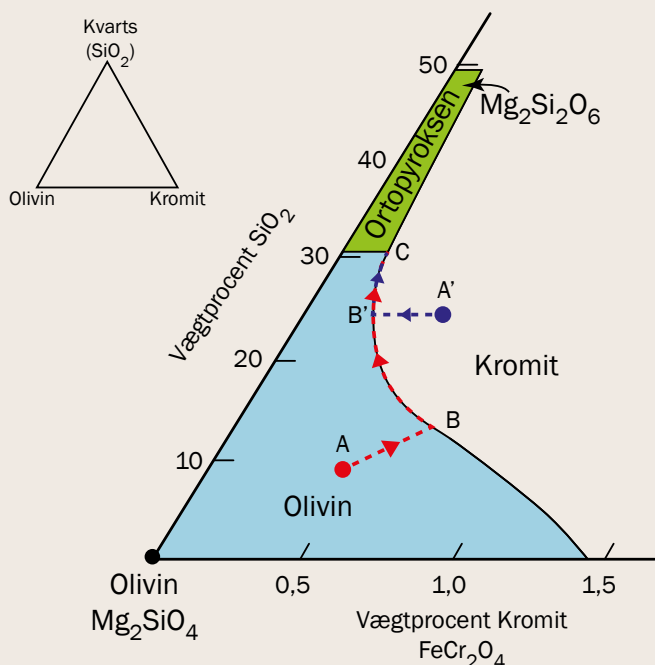
rentiering, fordi magmaen skifter kemisk sammensætning, efterhånden som mineraler med de højeste smeltepunkter udkrystalliseres fra den. Denne destillationsproces kan føre til, at værdifulde

mineraler med for eksempel krom, platin eller nikkel bliver koncentreret i bestemte zoner.

Hydrotermale forekomster dannes ud fra mineraler opløst i varmt vand



Figuren viser skematisk, hvordan forskellige mineraler i et magma udkrystalliserer af den smeltede stenmasse og synker ned på magmakammerets bund i en rækkefølge bestemt af deres smeltepunkt. Sådan kan der opstå en lagdeling af det størknede magma, hvor økonomisk interessante mineraler findes i bestemte lag. Illustration: Woudloper/CC BY-SA 3.0



Fasediagram

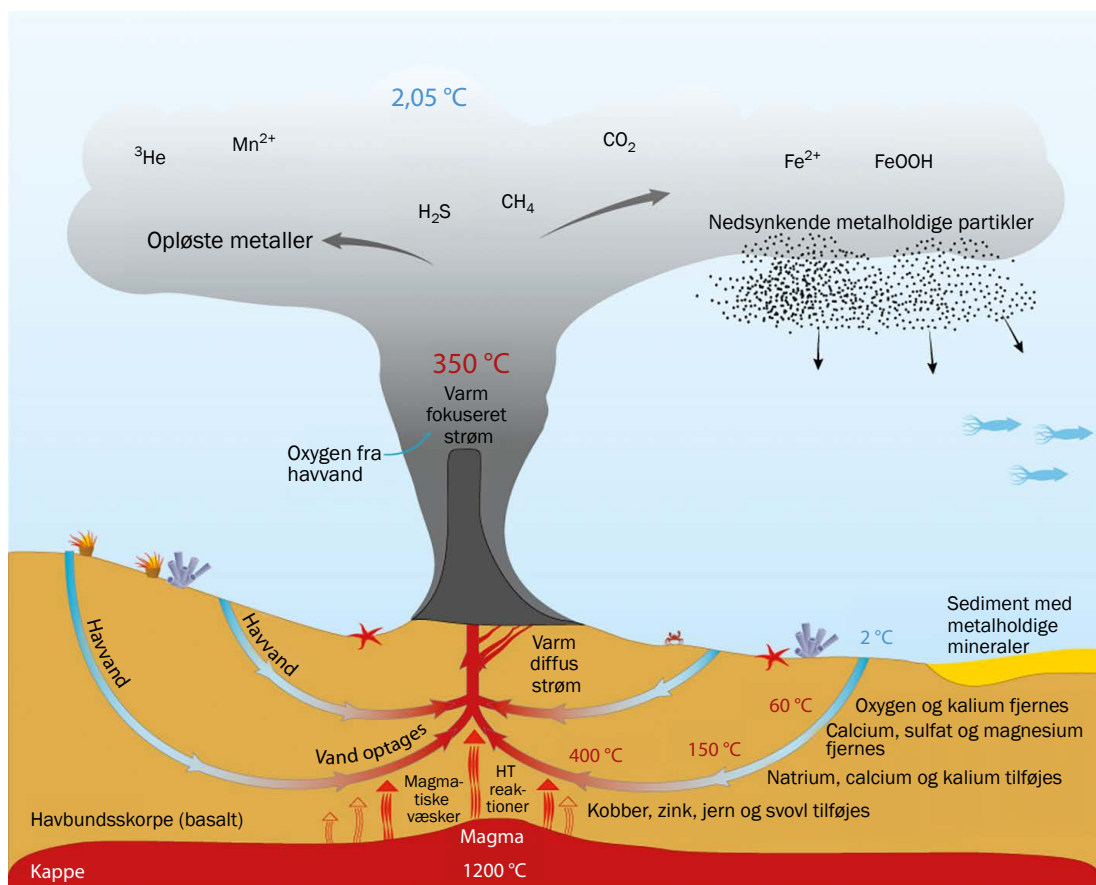
Et magma vil i udgangspunktet have en kemisk sammensætning bestemt af det geologiske miljø, det er opstået i. Krystalliseringsrækkefølgen af mineralerne kan anskueliggøres ved hjælp af et såkaldt fasediagram, hvor magmaets vigtigste komponenter placeres i hvert sit hjørne af en trekant (hvor hvert hjørne svarer til 100 vægtprocent af det pågældende mineral). Hvis magmaet i udgangspunktet har sammensætningen A, vil det starte med at krystallisere olivin, og sammensætningen af magmaet vil bevæge sig mod punkt B. Ved B begynder magmaet også at krystallisere kromit, men kun i ganske små mængder (cirka 1 vægtprocent) og kan derfor ikke blive økonomisk interessant. Efterhånden som magmaet krystalliserer olivin bliver magmaet gradvist mere rigt på SiO_2 og når et punkt ved C, hvor olivin ikke længere er stabilt, så der i stedet krystalliseres mineralet ortopyrokseen.

A' viser et eksempel, hvor magmaet er blevet "forurenset" med SiO_2 for eksempel ved at det er blevet blandet med et andet magma. Her er udgangspunktet flyttet ud i det felt, hvor der i starten udelukkende krystalliseres kromit, indtil den kemiske sammensætning når punktet B'. På den måde kan der dannes en økonomisk interessant forekomst af kromit.

(150-600 °C). Denne mineralrige væske kan udfælde mineraler, når den køler ned eller reagerer med de omkringliggende bjergarter. Disse forekomster er typisk forbundet med vulkansk aktivitet. Et eksempel er kobberforekomster af porfyr-typen, som dannes i områder med vulkansk aktivitet, hvor hydrotermale processer udfælder kobber i de omkringliggende bjergarter. Et andet eksempel er guld-sølv-forekomster, som også er relaterede til vulkansk aktivitet, men i lavere dybder og ved lavere temperaturer end porfyriske forekomster.

Sedimentære forekomster dannes ved aflejring af mineraler, for eksempel i en flod eller på havbunden. Det klassiske eksempel er, når tunge mineraler som guld koncentrerer af vandets bevægelse på bunden af en flod, hvor det kan findes ved hjælp af en "guldvasker". Sedimentære forekomster kan også dannes ved forvitring af bjergarter, hvor de letopløselige komponenter fjernes, og værdifulde mineraler koncentrerer i den resterende jordbund. Det gælder for eksempel den primære kilde til aluminium kaldet bauxit, der dannes ved intens forvitring af bjergarter under tropiske forhold, hvilket efterlader aluminiumrige mineraler.

Bådede jernformationer (*banded iron formation* eller BIF på engelsk), er også et prominent eksempel på



Black smokers findes i stort tal på havbunden langs de såkaldte midtoceanrygge, hvor ny havbund dannes og spredes i en proces, hvor magma strømmer op fra Jordens kappe. Figuren viser, hvordan cirkulerende vand i undergrunden medfører, at der dannes et sediment rigt på metalholdige mineraler omkring en black smoker. Det er et eksempel på en såkaldt hydrotermal mineralforekomst. Illustration: GRID-Arendal/CC BY-NC-SA 2.0 Deed/www.grida.no/resources/8166

en sedimentær forekomst. Disse er lagdelte kemiske sedimenter af jernmineraler, som er dannet på bunden af gamle oceaner.

Det er også værd at nævne såkaldte evaporitter, der dannes ved fordampning af havvand. Fordampningen efterlader aflejringer af salt (NaCl – når salt bliver til en hård bjergart kaldes den stensalt eller halit), gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) og eventuelt litiumrige mineraler.

Uligevægte skaber de magmatiske mineralforekomster

Verdens måske vigtigste magmatiske mineralforekomst er Bushveld-komplekset i Sydafrika. Den er dannet ud fra en kolossal mængde magma, der trængte op i jordens skorpe fra lag dybere nede for omkring 2 milliarder år siden. Efterhånden som magmaet afkølede, krystalliserede forskellige mineraler,

som blev aflejret på magmakammerets bund. I takt med dette ændrede den kemiske sammensætning af den resterende magma sig.

Den store mængde magma og den høje temperatur gjorde, at en del af de omgivende bjergarter smeltede og blandede sig med magmaet. Dette ændrede igen den kemiske komposition af magmaet, som fik et højere indhold af især silicium, hvilket havde indflydelse på den rækkefølge, som mineraler blev udkrystalliseret fra magmaen.

Man mener således, at denne form for "forurening" og deraf følgende uligevægt af magmaen kan forklare, hvorfor der opstod horisonter på bunden af magmakammeret, der var særligt berigede i det økonomisk interessante mineral kromit (FeCr_2O_4), hvorfra man kan udvinde metallet krom (Cr).

Ikke nok med, at disse lag er rige på krom, de indfanger typisk også små dråber af platin-gruppe-metaller som mikroskopiske inklusioner i de enkelte krystaller af kromit. Det medfører, at platin og især palladium kan optræde som biprodukter ved forarbejdningen af kromitmalmen fra for eksempel Bushveld, hvilket kan være en vigtig faktor for, hvorvidt en malmforekomst er økonomisk rentabel.

En anden vigtig geologisk proces, der kan opstå i forbindelse med forurening af et magma, er mætning med svovl. Det kan enten ske ved blanding af to typer magma, hvormed blandingsproduktet bliver overmættet med svovl, eller det kan ske ved, at de omkringliggende bjergarter er naturligt rige på svovl, fordi de indeholder svovlholdige mineraler. Begge mekanismer kan føre til, at magmaets evne til at



Ved Sudbury i Canada findes et af verdens største minekomplekser. Her udvindes primært nikkel og kobber, men også guld, sølv og platingruppe-mineraler. Forekomsterne ved Sudbury er et prominent eksempel på en såkaldt sulfidmineralisering.

Foto: Mysudbury.ca
Ouisudbury.ca/wikimedia commons/CC BY 2.0
DEED

opløse svovl overskrides, og at der opstår en selvstændig blanding af svovl og metaller såsom jern, kobber og nikkel. Ved afkøling vil denne blanding danne dråber af svovlholdige mineraler (sulfider), der enten kan "regne" ned på bunden af magmakammeret, eller de kan blive transporteret i turbulent strømning til andre niveauer i magmakammeret. Hvis der sker akkumulation af disse dråber, danner det en såkaldt sulfidmineralisering, som ofte er kraftigt beriget i nikkel, kobber og platin-gruppe metaller. Et godt ek-

sempel på dette findes ved Sudbury i Canada, hvor der har været minedrift siden 1884.

Både kromitforekomsterne i Bushveld og sulfidmineralisering i Sudbury viser, at man overordnet kan se magmatiske mineralforekomster som værende en konsekvens af uligevægte.

Aktive mineralforekomster på havbunden

Det bedste eksempel på hydrotermale mineralforekomster er såkaldte vulkanogene massive sulfidforekomster, som danner grundlag for minedrift af kobber, zink og bly. De historiske kobberforekomster på Cypern er netop af denne type.

Vulkanogene massive sulfidforekomster er faktisk dannet ved en aktiv geologisk proces, vi kan observere lige nu og her på havbunden. Det foregår i geologiske miljøer med vulkansk aktivitet på grund af spredningen af de tektoniske plader – for eksempel langs de såkaldte midtoceanrygge.

Spredningen af de tektoniske plader skaber sprækker i havbunden, som består af bjergarten basalt. Havvand siver ned i disse sprækker og dybere ned i jordskorpen, hvor det bliver varmet op på grund af den underliggende magma. Det varme, saltrige havvand er i stand til at opløse metaller såsom kobber,

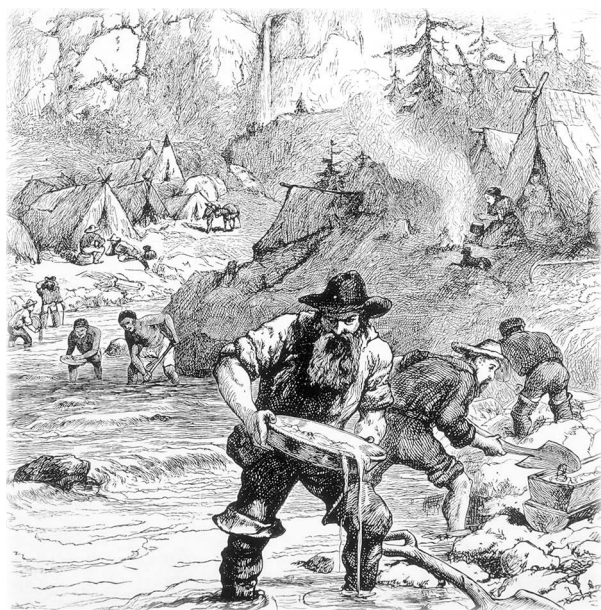
zink, bly og jern fra de omkringliggende basaltiske bjergarter i form af chloridkomplekser. På den måde kan vandet opnå en høj koncentration af opløste metaller og sulfider. Når det varme og metalberigede vand stiger op mod havbunds-overfladen igen og strømmer ud i det kolde havvand, medfører den drastiske temperaturforskelle, at de opløste mineraler udfældes fra opløsningen. Der, hvor vandet strømmer ud på havbunden, opstår søjler – såkaldte "smokers". *Black smokers* udsender mørkere partikler på grund af det høje sulfidindhold, mens *white smokers* udsender mineraler med lysere farver, som typisk er kalciumsulfater. Omkring smokerne udfældes sulfidmineralerne og akkumuleres på havbunden. Over tid kan det vokse sig til betydelige forekomster.

De udfældede mineraler inkluderer blandt andet det jernholdige mineral pyrit (FeS_2), chalcopyrit (CuFeS_2), som både indeholder kobber og jern, sfalerit (ZnS), der indeholder zink samt galena (PbS), der indeholder bly.

Geologiske processer, såsom kollision mellem de tektoniske plader, har løftet nogle af disse oprindelige havbundsforekomster op over havniveau og dermed gjort dem tilgængelige for minedrift. Vulkanogene massive sulfidforekomster giver dermed et unikt indblik i det komplekse samspil mellem geologiske, kemiske og fysiske processer, der forekommer på havbunden og ellers kun kan observeres med undervandsfartøjer.

Havbunden som en mineralressource

Af andre mineralforekomster, som aktivt dannes på havbunden, kan man nævne de efterhånden meget omtalte manganknolde. Disse dannes ved kemisk udfældning i koldt vand, og det tager mange millioner år at danne en økonomisk interessant koncentration i form af knolde på havbunden. En mere korrekt betegnelse for disse manganknolde er polymetalliske noder, fordi



Et klassisk eksempel på en sedimentær mineralforekomst er guld på bunden af en flod. Her bliver guldet koncentreret bestemte steder, fordi det er tungere end andre partikler, der aflejres på bunden. Sådanne forekomster var en anledning til den "guldfeber", der blandt andet rasede i Californien i midten af 1800-tallet. Foto: Shutterstock

de udover mangan og jern som de primære metaller, også indeholder betydelige mængder af nikkel, cobalt og kobber. Dermed repræsenterer de en fænomenal kombination af mange af de metaller, som der vil være stor efterspørgsel på til mange grønne energiteknologier. Fordelen ved disse forekomster på havbunden er, at man kan bruge 100 % af materialet fra disse polymetalliske noder og dermed ikke får problemer med en stor mængde mineaffald, der skal skaffes af vejen. En anden fordel er, at man ikke påvirker lokalbefolkninger, som det er tilfældet med de fleste miner på landjorden.

Til gengæld er det store spørgsmål i hvilken grad minedrift på havbunden vil påvirke livet i dybhavet og i havet generelt, fordi der vil blive hvirvlet mudder op i vandsøjlen, som potentielt kan sprede sig over store afstande. Dette er naturligvis noget, der undersøges på højtryk og kan blive afgørende for, om denne enorme ressource kan udnyttes i fremtiden.

Jordbund som kilde til metaller

Når tektoniske processer bringer bjergarter op over havniveau, sker der en naturlig nedbrydning af disse, når de udsættes for vejr og vind. Dette går særlig hurtigt i tropiske egne, fordi temperaturen har betydning for de processer, der eroderer og forvirrer bjergarter.

I forbindelse med nedbrydningen af de oprindelige mineraler udvaskes mobile grundstoffer som magnesium, calcium og natrium. Når visse grundstoffer fjernes, må der nødvendigvis ske en relativ berigelse af de grundstoffer, der bliver tilbage. Hvis det er bjergarten granit, der nedbrydes, kan denne forvirringsproces i tropiske egne medføre en kraftig ophobning af aluminiumrige mineraler. Hvis det i stedet er bjergarter i gammel havbund, der nedbrydes, kan der ske en koncentration af nikkelholdige mineraler.

For at udnytte sådanne jordbundsforekomster bliver man i sagens



Forvirringsprocesser i tropejord gør, at værdifulde metaller som nikkel og aluminium bliver koncentreret i jorden. Men for at få fat i de værdifulde mineraler må regnskov ryddes, og udvindingen af metallerne producerer store mængder giftigt affald. På billedet ses mineaffald fra aluminiumproduktion i Guinea i Vestafrika.
Foto: Shutterstock

natur nødt til at udgrave jordbunden, hvilket kan have alvorlige miljømæssige konsekvenser. Et trist eksempel er de meget store nikkelforekomster, man finder i Indonesien. Her er skove blevet ryddet for at få fat i jordbunden, og der efterlades store mængde mineaffald, når nikkel er blevet udvundet ved reaktioner med svovlsyre.

Den slags eksempler findes der desværre mange af.

Store overvejelser om fremtidens minedrift

Som nævnt i starten af artiklen kommer verden forventeligt til at skruer op for minedriften i de kommende år for at kunne følge med efterspørgslen på råstoffer til brug for den grønne omstilling. Hvis denne udvikling ikke skal skabe lige så mange problemer, som den løser, skal det selvfølgelig foregå på en miljømæssig forsvarlig måde. Og det duer heller ikke, hvis vi i vores del af verden bliver endnu mere afhængige af enkelte lande til at levere råstofferne, end vi i dag er af leverandører af fossile brændsler.

I dag er hele den vestlige verden dybt afhængig af minedrift i det

globale syd, for eksempel i Congo (cobalt), Chile (litium og kobber), Sydafrika (platin og krom) og Indonesien (nikkel). Dertil kommer, at forarbejdning og raffinering af råmalmen i vidt omfang foregår i Kina, som også sidder på den strategisk vigtige produktion af solceller, neodymmagneter og litium-ion-batterier. Kina har dermed stor indflydelse på muligheden for at implementere den grønne omstilling i den vestlige verden.

Vi står derfor i Danmark og i Vesten generelt overfor nogle svære overvejelser og beslutninger om, hvordan vi i fremtiden skal få adgang til de mange forskellige grundstoffer, der indgår i al højteknologi. Vil vi for eksempel fortsat acceptere, at regnskov ryddes, for at vi kan få fat i den nikkelholdige jordbund? Vil vi tillade, at der bliver åbnet helt nye miner i skrøbelige arktiske miljøer? Eller vil vi hellere have minedrift på havbunden af dybhavet, sådan som Norge har meget konkrete planer om?

Det er nogle af de spørgsmål, som kommer til at fylde i den nærmeste fremtid, og hvor geovidenskabelig viden kommer til at spille en vigtig rolle. ■

Videre læsning:
Videncenter for mineralske råstoffer og materialer (MiMa) har denne bog til gymnasie lærere: mima.geus.dk/mineralske-raastoffer-baeredygtighed-og-innovation/

Videncenter for mineralske råstoffer og Materialer (MiMa): mima.geus.dk/udgivelser/

En lærebog på engelsk: Kesler, S.E. and Simon, A.C., 2015: Mineral Resources, Economics and the Environment. Kan frit hentes via dx.doi.org/10.7302/22482

International Energy Agency deler information om forbrug og estimater om fremtidens behov for metaller: www.iea.org/topics/critical-minerals

Videnskabelig artikel: Wolfgang D. Maier, D. D. Muir, S. J. Barnes & K. Szilas. Petrogenesis of Ni-sulfide mineralisation in the ca. 3.0 Ga Maniitsoq intrusive belt, western Greenland. *Mineralium Deposita* (2024). doi.org/10.1007/s00126-024-01282-3