

KAPITEL 20



FIGUR 160. Mange mennesker har forsøgt at ernære sig ved at finde guld i residualforekomster med vaskepande. Her er det under guldfeberen i Californien, USA omkring 1850, men det foregår stadig i mindre omfang i Californien, og i større omfang i områder i det Globale Syd. Shutterstock.

RÅSTOFFERNE I DET GEOLOGISKE KREDSLØB

DANNELSE AF DE MINERALSKE RÅSTOFFER

Man bruger begrebet en mineralforekomst, hvis mineralerne findes i så stor mængde og i så god kvalitet, at de eventuelt kan danne grundlag for udnyttelse. For at en mineralforekomst kan dannes, skal der ved geologiske processer ske en opkoncentration fra de almindelige bjergarters sammensætning til en malmbjergart, som har forhøjede (som regel stærkt) koncentrationer af de bestemte grundstoffer (figur 162).

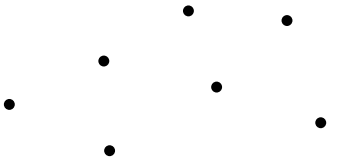
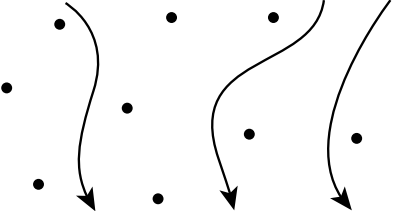
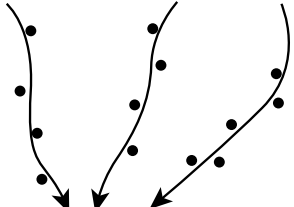

De malmdannende processer kan opstå i fem principielt forskellige geologiske miljøer (figur 161)

- Magmatiske forekomster
- Hydrotermale forekomster
- Sedimentære forekomster
- Tungsandsforekomster
- Residualforekomster

Disse processer er knyttet til de regionale geologiske stormiljøer (figur 163).

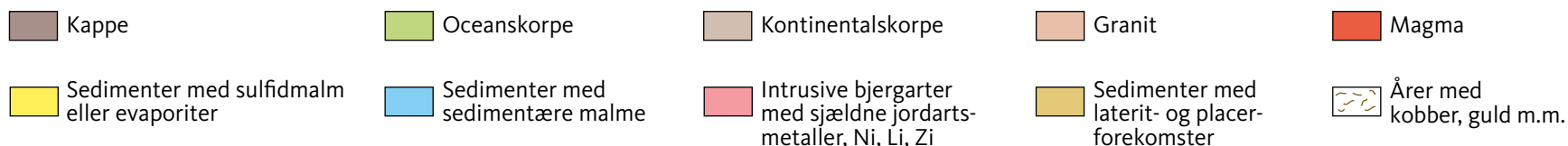
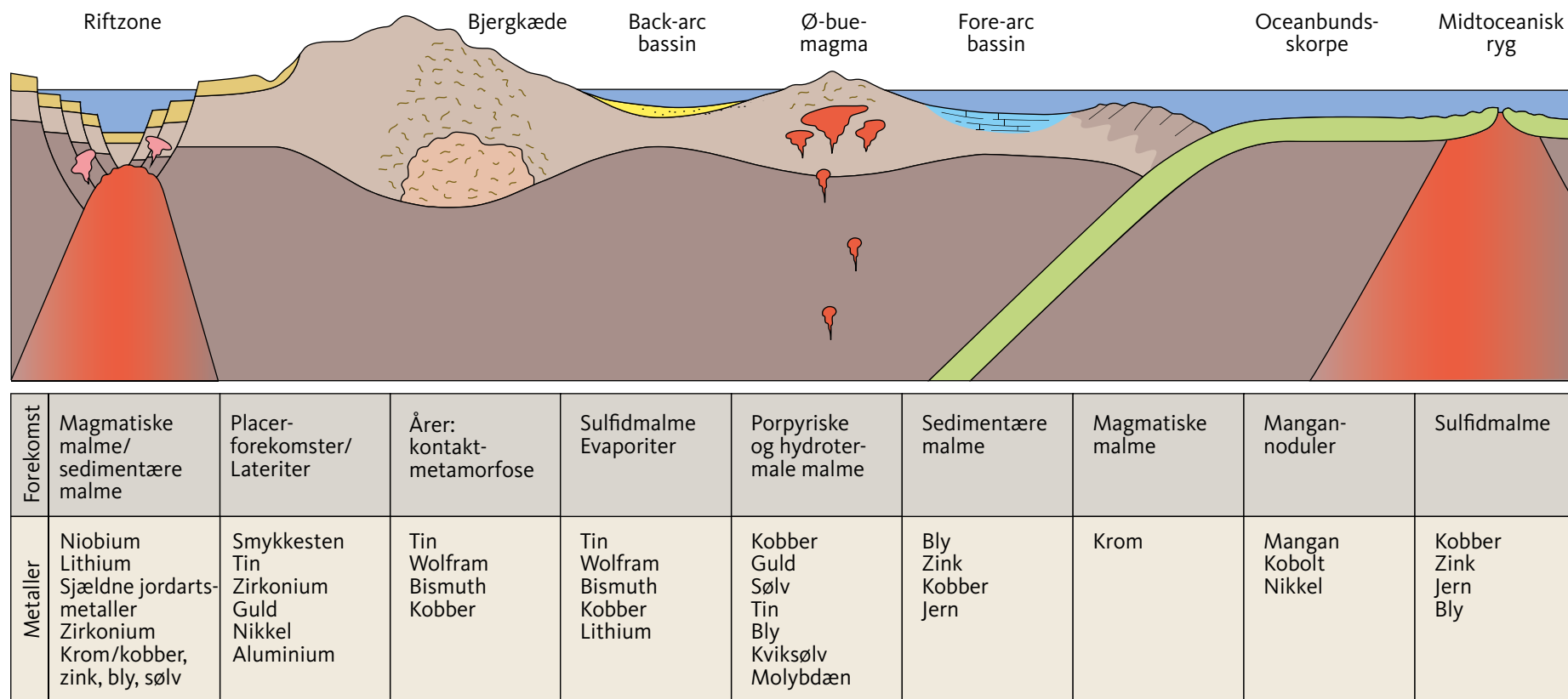
Forekomsttype	Kilde	Mobilisering/transport	Fælde
Magmatiske malme	Kappen	Opsmeltning af kappe	Krystallisation og bundfældning
Hydrotermale malme	Magma	Varm væske med opløste stoffer fra magmaet gennemstrømmer bjergarter omkring magmalegemet.	Stofferne i den varme væske udfældes som regel i sprækker, når væsken afkøles, eller de reagerer kemisk med omgivelserne.
Sedimentære malme	Store sedimentære områder i havet	Opløsning i havvand	Områder i sedimentpakkerne med frit svovl.
Båndet jernmalm (hører også til de sedimentære)	Vulkanisme	De tidlige oceaner i Jordens historie havde store mængder jern i opløsning.	Da fotosyntetiserende liv begyndte at danne ilt i havene, dannedes jernoxider, som sank til bunds på havbunden.
Tungsands-/placerforekomst	Bjergarter som indeholder det pågældende mineral i større eller mindre mængder	Erosion og forvitring af kildeområdet samt transport i vandløb.	Udfældelse ved sortering i strømmende vand (eller bølger). De tunge mineraler vil aflejres i floden i områder med mindre vandenergi.
Residualmalme 1. Grus-, sand- og lerforekomster 2. Lateritforekomster	1. Almindelige bjergarter i Jordens overflade 2. Fx aluminiumsholdige bjergarter	1. Almindelig erosion og transport af bjergartsfragmenter. 2. Intens kemisk forvitring og bortvaskning af de stoffer vi ikke er interesserede i.	1. Aflejring af fx grus, sand og ler i forskellige geologiske miljøer. 2. Tilbageblivelse af fx aluminiumsmineralet bauxit, når alt andet er vasket væk.

FIGUR 161. Oversigt over udvalgte forekomsttyper. Af MiMa (2019).

Kilde	Område som leverer de grundstoffer, som udgør råstoffet; det kan være et stort bjergartslegeme med lave koncentrationer af det pågældende grundstof.	Lav koncentration 
Mobilisering	Råstoffet skal mobiliseres fra kilden og kræver en proces, der frigør det pågældende grundstof; fx forvitring, erosion, opsmeltning, opløsning i hydrotermale væsker eller saltopløsninger.	
Transport	Der skal have været en transportmekanisme til at føre de mobiliserede elementer videre. Transportmediet kan være magma, forskellige opløsninger eller vand i en flod.	
Fælde	Endelig skal der være en årsag, også kaldet en fælde, til at grundstofferne udfælder som mineraler i en mere koncentreret form end i det oprindelige kildeområde.	Høj koncentration 

FIGUR 162. Skematisk fremstilling af de fire trin i den malmdannende proces. Af MiMa (2019) efter Sørensen (1989).

FIGUR 163. De metalliske råstoffers fordeling i de geologiske stormiljøer. Dannelsen af forskellige forekomster er tæt knyttet til den geologiske udvikling af et område. De store pladetektoniske miljøer afgør ofte, hvilke geologiske processer der kan forekomme på en given lokalitet og dermed, hvor man kan forvente at finde forekomster af de forskellige mineralske råstoffer. Af MiMa (2019) efter Skinner & Porter (1987).



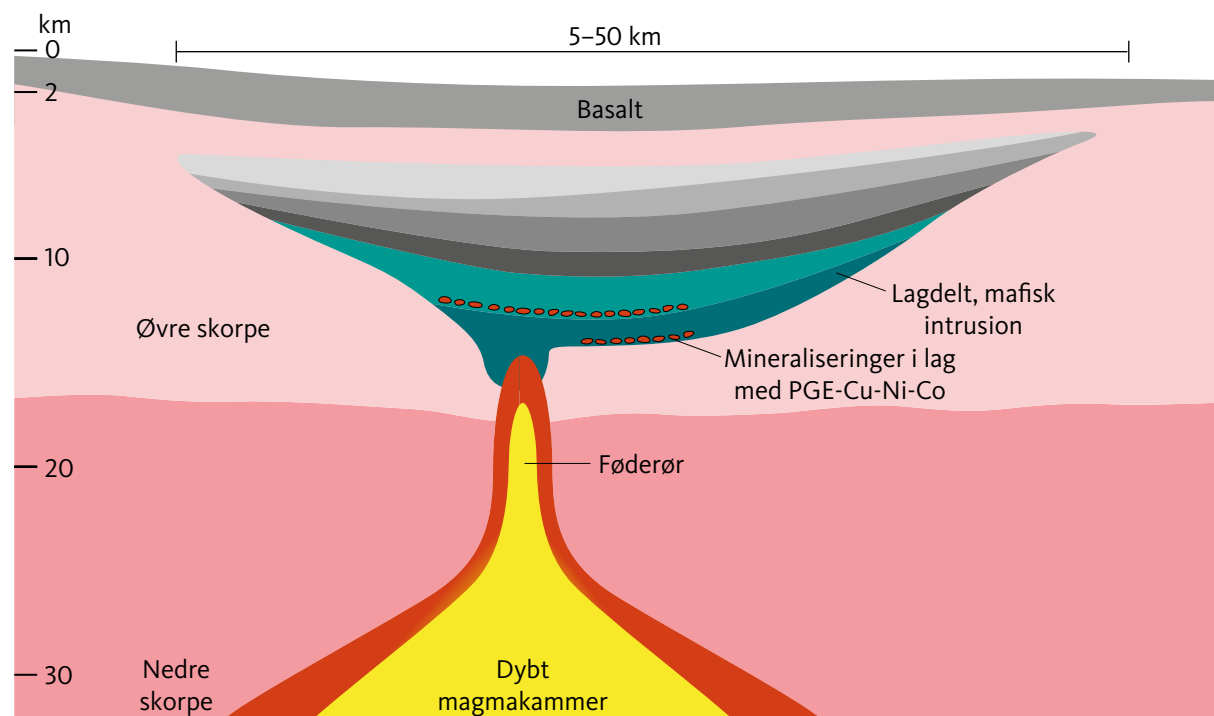
MAGMATISKE FOREKOMSTER

Visse grundstoffer kan opkoncentreres i jordskorpen, fordi de danner tunge mineraler, som, når de størkner i magmaet, kan synke ned i bunden af magmaet. Det gælder for bl.a. platin og nikkel (figur 164).

Andre mineraler kan opkoncentreres i den sidste lille del af magmaet og størkne til sidst som såkaldte pegmatitter. I denne sidste rest af magmaet kan de grundstoffer, som ikke passer ind i de mest almindelige mineraler, opkoncentreres. Det kan fx være udkrystallisering af sjældne jordartsmetaller, zirkonium, niobium, platingruppemetallerne m.fl.

HYDROTHERMALE FOREKOMSTER

Hydrotermale forekomster dannes, når vand, der befinder sig under tryk langt nede i jorden, varmes op af et indtrængende magma (figur 165). Det varme vand opløser store mængder mineraler fra selve magmaet eller fra de omkringliggende bjergarter. Man taler om en fluid, altså at grundstofferne er blevet opløst i en væske. På grund af trykket trænger væsken, som nu indeholder mange grundstoffer i opløsning, ud i sprækker i de

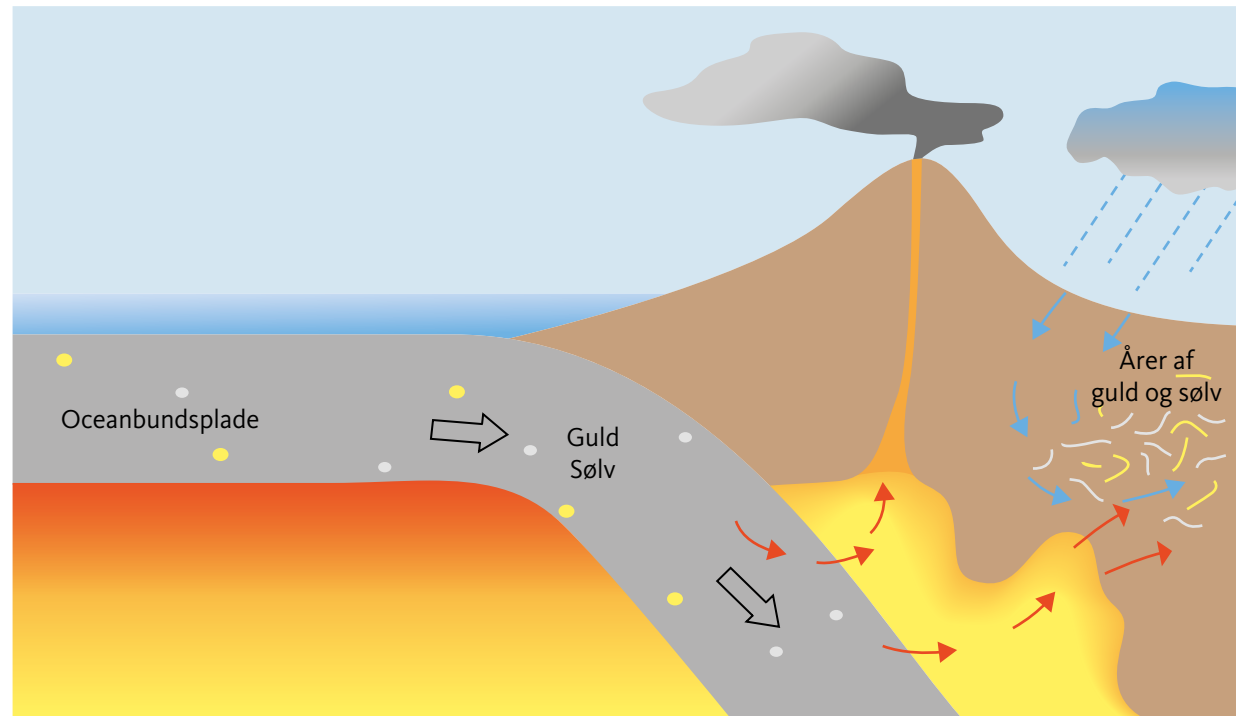


FIGUR 164. Magmatiske forekomster i lagdelt mafisk intrusion. I områder under kontinenter med meget store smeltedannelser, fx et hotspot eller en riftzone, kan der dannes mafiske intrusioner, hvori mineralerne, efterhånden som de størkner, falder til bunds og på den måde sorteres efter massefylde. Mafisk betyder, at det er et magma, der danner mange mørke mineraler og ingen kvarts. I de lagdelte intrusioner vil der, hvis smeltesammensætningen tillader det, kunne dannes lag af platingruppemetaller (PGE), kobber (Cu), nikkel (Ni) og kobolt (Co) i forskellige forbindelser. Disse mineraler har høj massefylde og vil samles som bundfald i de nederste lag af intrusionen. Af MiMa (2019).

omgivende bjergarter. Når tryk- og temperaturforholdene bliver lavere, udfældes nogle af de opløste grundstoffer i såkaldte årer, dvs. at sprækker udfyldes med mineraler. Hydrotermale forekomster kan b.l.a. indeholde guld, sølv og kobber.

SEDIMENTÆRE FOREKOMSTER

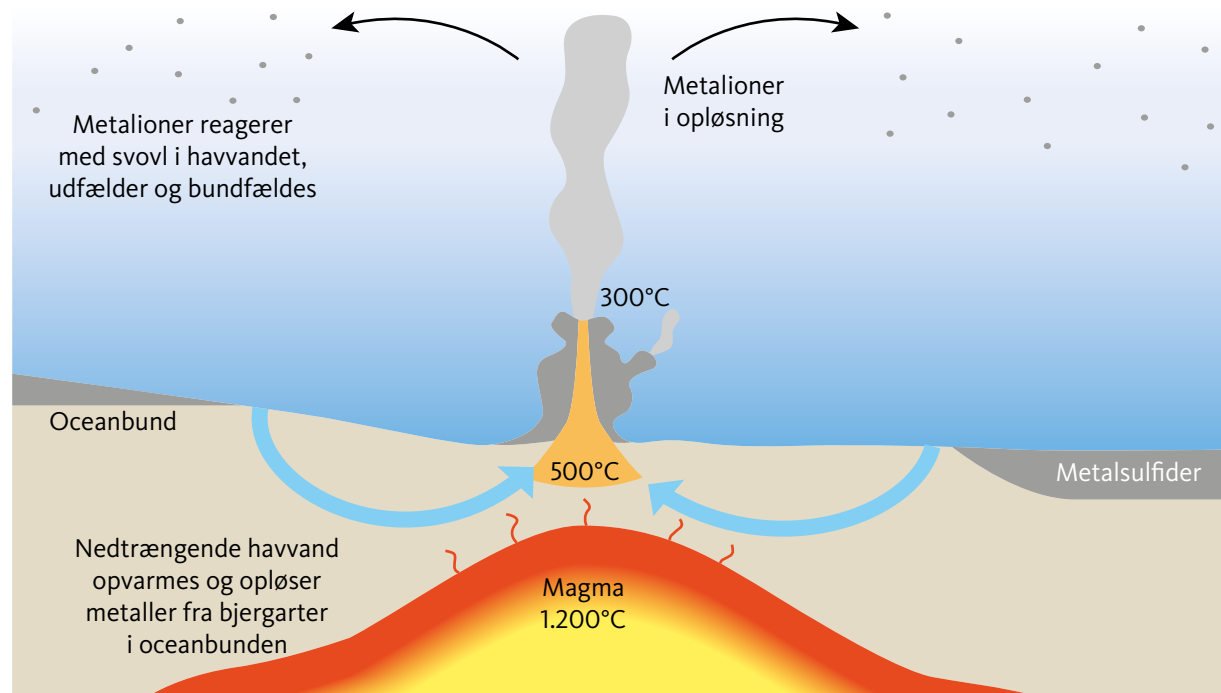
I de store sedimentære bassiner i havet er der meget saltholdige væsker (fluider/bri-nes), som indeholder opløsninger af forskellige grundstoffer. Det kan enten være grundstoffer, der opløses fra sedimentlagene, eller det kan være et tilskud af grundstoffer fra magmatisk aktivitet, fx fra vulkansk aktivitet ved midtoceanryggene. Metaller vil udfældes fra saltopløsningen, hvis det møder en kemisk fælde, fx lag som indeholder meget organisk materiale eller svovl. Den meget saltholdige fluid kan også koncentreres i lavpunkter på havbunden fordi den har højere massefylde end havvandet og derfor udfældes som store massive metalsulfidlag (figur 166). Selvom der fx kun findes meget lidt zink eller kobber i almindelige sedimenter, kan det ved disse processer blive til enorme mængder, når kildeområdet er stort nok. Store zink- og kobberforekomster er ofte af sedimentær type.



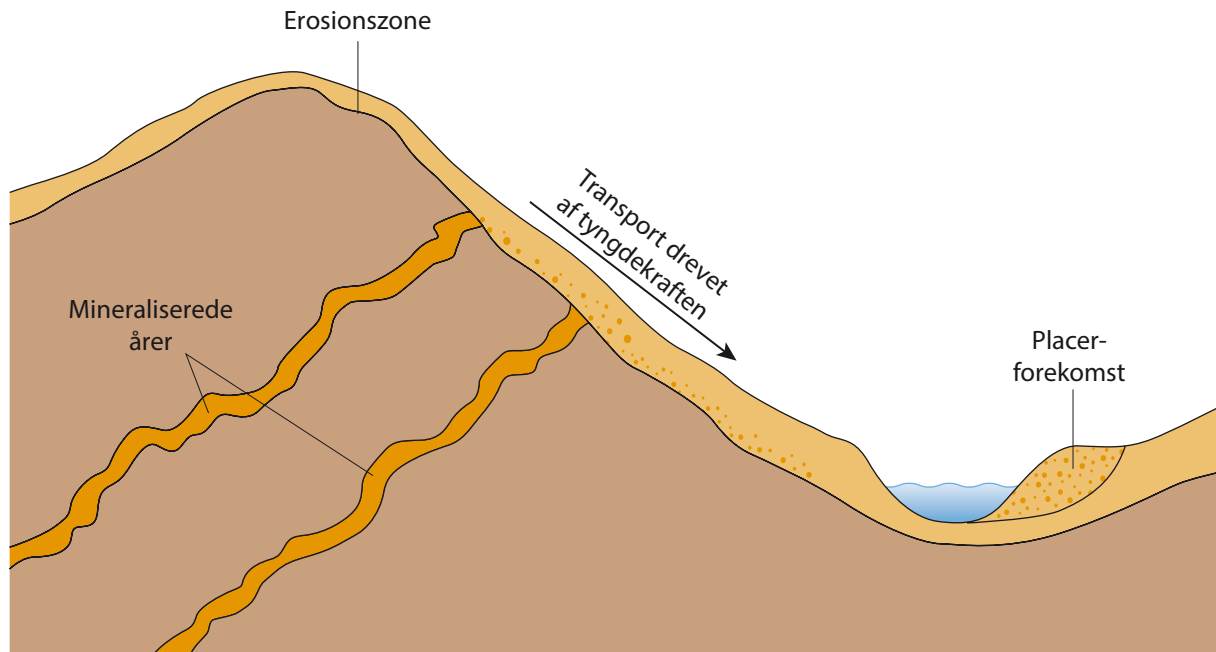
FIGUR 165. Hydrotermale forekomster. Tværsnit af subduktionszone med magmadannelse. Varmen fra den opadstigende magma driver konvektion (varme opløsninger stiger opad; når de har afgivet deres varme, vil de begynde at synke ned igen indtil de varmes op og søger op igen osv.) af vandige opløsninger, som kan bære på metaller som kobber, molybdæn og guld. Af MiMa (2019).

Denne type omfatter også jernforekomster af typen bandede jernformationer (BIF – Banded Iron Formation).

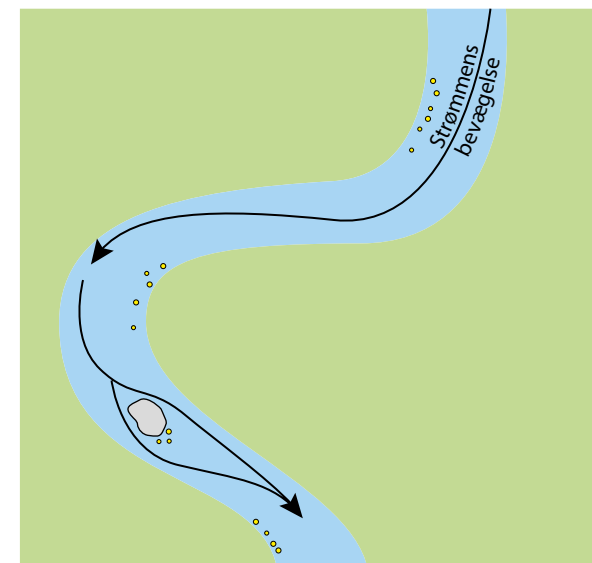
Inddampningsminerale dannet i saltsøer er kemiske sedimente og tilhører også gruppen af sedimentære forekomster. Denne type er bl.a. kendt fra bagsiden af den vulkanske ryg i Atacamørkenen i Andesbjergene, Sydamerika. Her dannes afløbsfrie søer, hvori lithium ophobes, når det forvitrer fra de vulkanske bjergarter og transporteres til søen ved hjælp af regnvand og vind, ligesom det også bliver tilført ved hjælp af opløsninger fra såkaldte hot-springs. Hot-springs er almindelige i vulkansk aktive områder og er grundvand, der opvarmes af de underliggende magmakamre og tilføres mineraler fra magma og de bjergarter, opløsningen gennemløber. Inddampningssøer findes kun i ørkenklima, hvor regn er sjælden. Søens vand fordamper i takt med, at det tilføres og mineralindholdet udfældes inden, der igen kommer regn og inddampningen kan fortsætte. Der findes derfor kun lithiumforekomster i saltsøer i de subtropiske egne omkring den 25. breddegrad.



FIGUR 166. Hydrotermale og sedimentære forekomster. Snit af oceanbund med en black smoker og dannelsen af massive metalsulfider. Black smokers er strukturer på havbunden, som dannes ved at varme opløsninger med forskellige metaller strømmer ud i havet på en måde, så opløsningen ligner en røgsky. Efterhånden opbygges en skorstenslignende struktur af udfældede metaller. Af MiMa (2019).



FIGUR 168. Tungsandsforekomst. En bjergart med mineralisering eroderes. Erosionsmaterialerne skylles ned i en flod, hvor sedimenterne sorteres i forhold til massefylde. Tunge mineraler koncentrerer i områder med lav energi i floden. Herfra kan mineralerne udvindes. Tungsandsforekomster udnyttes ofte til småskala-minedrift. Af MiMa (2019) efter Encyclopædia Britannica (1999).

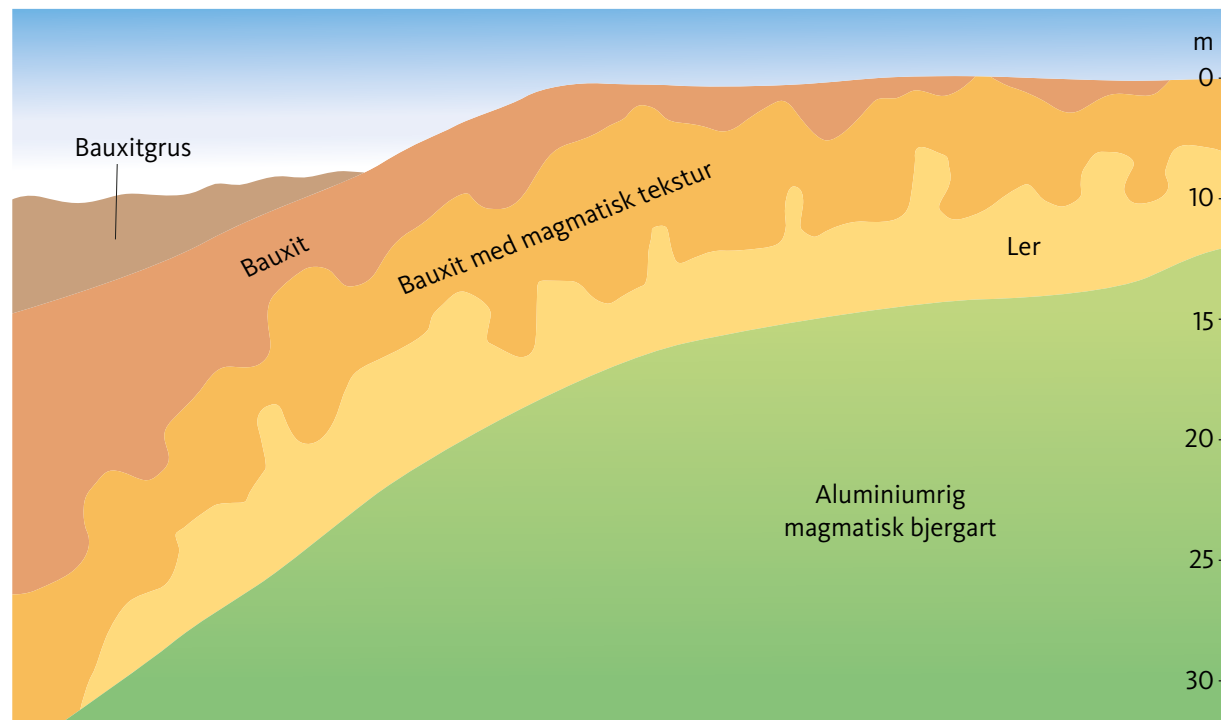


FIGUR 167. Tungsandsforekomster. Strømmen i en flod fordeler sig ikke jævnt i vandet, men vil variere hen over flodens tværsnit. Vandets hastighed øges i ydersiden af meanderbuen (det sving der dannes i en naturligt løbende flod), hvilket medfører erosion i ydersiden af meanderbuen og aflejring i indersiden af meanderbuen, hvor man derfor kan finde opkoncentrerede mineralske forekomster. Det samme kan ske på læsiden af en sten i floden. Af MiMa (2019).

TUNGSANDSFOREKOMSTER

Bjergarter eroderes, og mineralkornene transporteres derefter mod havniveau i vandløb og floder. I denne proces sorteres mineralkornene af det strømmende vand, da de falder til bunds, hvor strømmen er lav i forhold til deres vægtfylde (densitet). Når floden mister energi vil mineralkorn med størst vægtfylde falde til bunds tidligere end korn med lav vægtfylde. Der sker derfor en opkoncentrering af mineralkornene (figur 167 og figur 168), og der dannes en placerforekomst.

Denne type er særligt kendt for forekomster af guld, tin og titan, som kan udvindes med simple sorteringsmetoder baseret på densitetsforskelle. Bedst kendt er vaskepanden, som bruges mange steder til udvinding af guld. Men også mange ædelsten, som fx rubin, diamanter og turmalin, findes i denne type forekomst, som også kendes under navnet tungsandsforekomst eller placerforekomst. Det kræver selvfølgelig, at disse mineraler og guld allerede findes i de bjergarter, som er blevet eroderet i flodens opland. Tungsandsforekomster kan også forekomme i strandmiljøer, hvor bølger sorterer mine-



FIGUR 169. Residualforekomster. Dannelsen af bauxitmalm sker ved, at en aluminiumsrig magmatisk bjergart forvitres i et fugtigt, varmt klima. Forvitringen medfører, at mange af grundstofferne i den oprindelige bjergart udvaskes, men aluminium bliver tilbage og bindes i mineralet bauxit. Som figuren viser, er der flere zoner af omdannelse, hvor den oprindelige bjergarts tekstur forsvinder mere og mere op efter. Af MiMa (2019).

ralerne. De fleste har måske bemærket, at der på de danske strande ofte er tynde lag af sorte mineraler, hvilket skyldes et højt indhold af magnetit og granat.

RESIDUALFOREKOMSTER

Residualforekomster består af forvittringsprodukter, der er dannet som følge af fysiske og kemiske processer, der nedbryder bjergarter. Gruppen omfatter både råstofferne sand, grus og sten, som er resultatet af fysiske processer, samt gruppen af råstoffer, der er dannet ved kemiske processer nær jordens overflade, fx laterit (nikkelmalm) og bauxit (aluminiummalm) (figur 169). Ved forvittring sker der en kraftig opløsning af feldspat i overfladebjergarterne. De opløste grundstoffer (Si og K) vaskes ud af bjergarten, mens aluminium eller nikkel bindes i uopløselige mineraler og opkoncentreres i bjergarten. Den intense forvittring kræver tropisk klima og god dræning, for at de opløste stoffer kan vaskes væk.

Der er altså mange forskellige geologiske processer, som kan føre til dannelsen af en mineralforekomst. Mange af dem er knyttet til miljøer omkring pladegrænser, det

gælder særligt de processer, der kræver en varmekilde, mens også faktorer som klima og trykforhold spiller en rolle i dannelsen af nogle typer forekomster.

RÅSTOFFERNES GEOGRAFISKE FORDELING

Råstoffernes geografiske fordeling er resultat af processer i det geologiske kredsløb, som har foregået kontinuerligt gennem Jordens historie (figur 145 og figur 163). Da landenes geologiske historie er forskellige, er fordelingen af mineralske råstoffer også forskellig fra land til land. Det er oplagt, at store lande har større sandsynlighed for at have mineralforekomster som kan udnyttes, fordi et større areal kan repræsentere mange geologiske udviklingsforløb. Derfor er det også store lande, der dominerer i produktionen af mineraler.

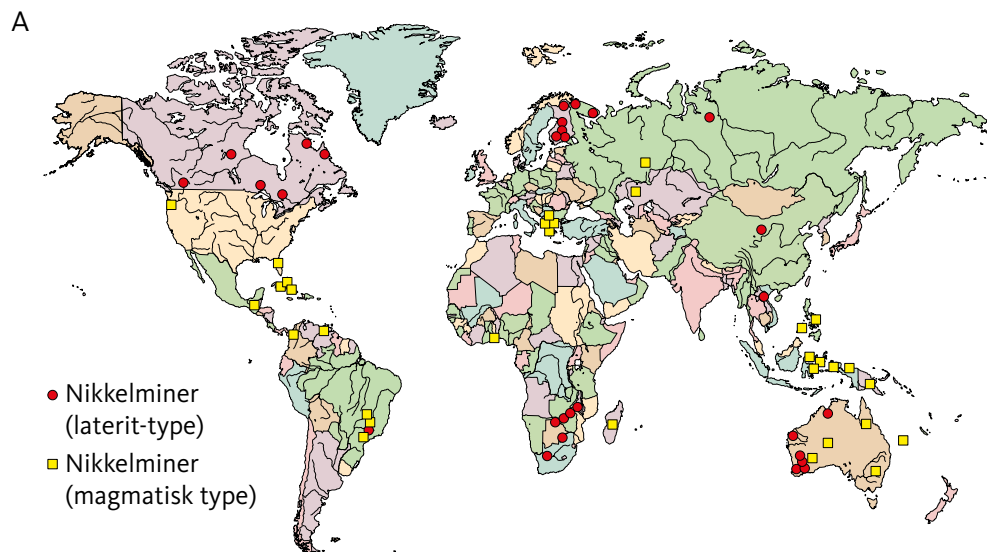
I princippet kan alle lande have vigtige råstoffer i undergrunden. Men hvor er de? Det er geologernes opgave at forstå, hvilke geologiske miljøer der har domineret hvor og hvornår, så man kan finde råstofferne. Nøglen til denne forståelse er bl.a. geologiske kort. Mens nogle råstoffer findes i flere forskellige geologiske miljøer, vil nogle

være begrænset til nogle særlige geologiske miljøer.

En betydelig del af verdens kobberproduktion kommer fra miner i det vestlige Syd- og Nordamerika, hvor forekomsterne er dannet som følge af konvergerende (destruktive) pladegrænser, der har været aktive i millioner af år (figur 170. c). Af samme grund er Chile og Peru blandt de største producenter i verden af kobbermalm. Men da kobber også kan dannes i store sedimentære bassiner og i magmatiske forekomster, udvindes der også kobber i mange andre dele af verden, fx Canada, Australien, Europa og Rusland.

Aluminium og nikkel brydes mest fra bauxit- og lateritforekomster, som dannes i områder domineret af tropisk klima igennem en lang periode (figur 170. a). De fleste lateritforekomster er dannet i nutiden (geologisk set måske indenfor den sidste million år) og findes i lande i Sydøstasien og Caribien, hvor de rette klimatiske betingelser for intens forvittring er til stede.

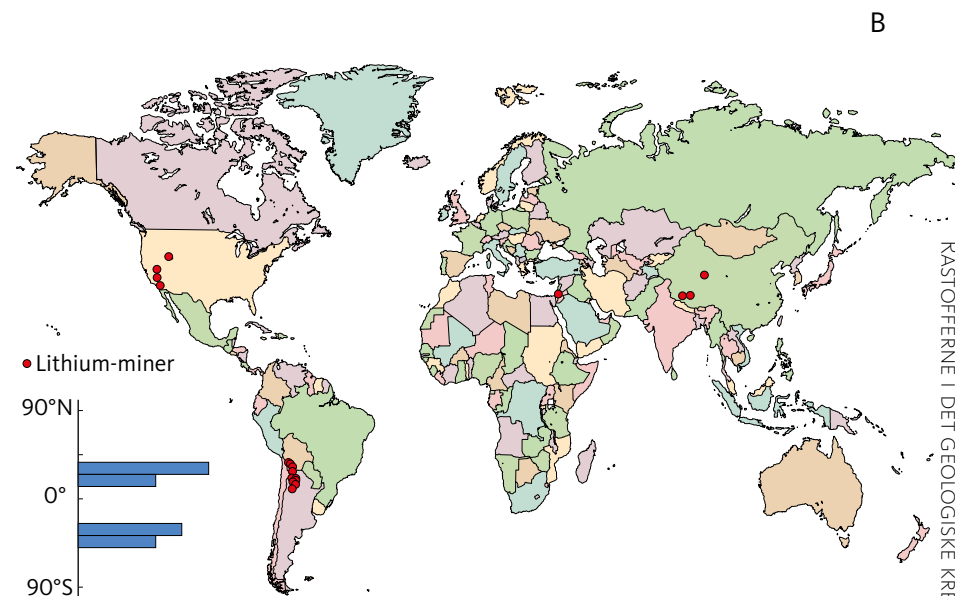
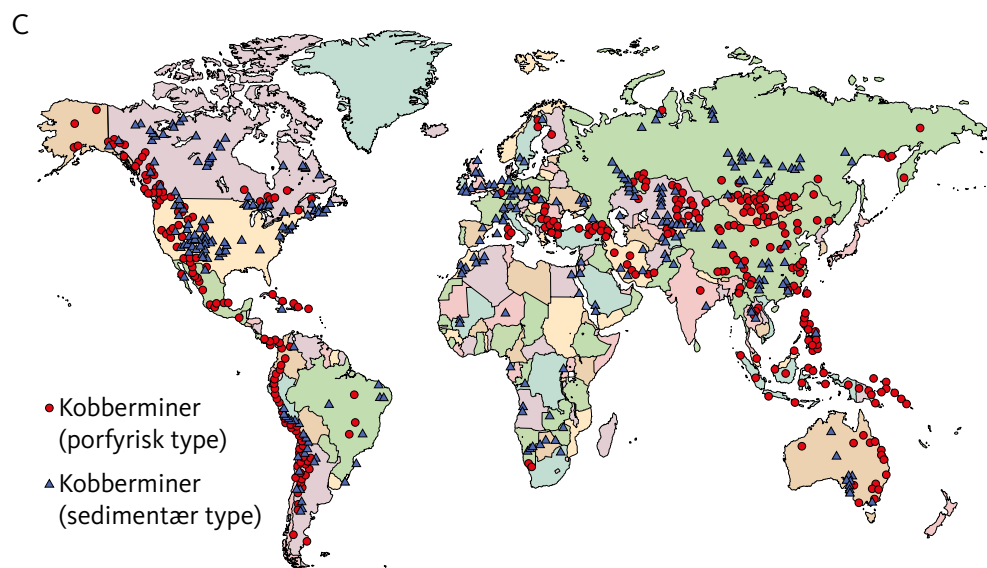
Lithium brydes både fra magmatiske forekomster, hvor det er pladetektoniske processer, der har bestemt placeringen, og fra inddampningssøer, hvor den rette lithiumri-



B. Forekomster af lithium fra ind-dampningssøer med søjlediagram der viser fordelingen i forhold til breddegrad. Efter Bradley et al. (2013).

FIGUR 170. Udvalgte grundstofforekomster.

A. Nikkel-lateritforekomster (gul) og magmatiske nikkelforekomster (rød). Efter Elias (2002).



C. Kobberforekomster i verden. De røde er porfyrforkomster, som dannes i forbindelse med subduktionszoner. Nogle af subduktionszonerne er aktive i dag, fx hele vestkysten af de amerikanske kontinenter. De porfyrforkomster, som findes hele vejen over Europa, Mellemøsten og Asien, skyldes en subduktionszone, som ikke længere er aktiv. Her lå engang Tethys-oceanet, som lukkedes for ca. 30 mio. år siden ved at subduktionszonen til sidst førte kontinenterne sammen i en kollision. ½Det er denne kollision som er skyld i den alpine bjergkædefoldning (inkluderer bl.a. Alperne og Himalaya). Efter USGS (2005).

ge geologi skal findes i et gunstigt klimatisk og landskabsmæssigt miljø (figur 170. b).

De fleste af de store forekomster af jern er dannet meget tidligt i Jordens historie, som kemiske sedimenter udfældet fra havvand i store kontinentale bassiner. Jernminer af denne type, de båndede jernformationer eller BIF, findes, hvor disse bjergarter fra Jordens tidligste historie er bevaret, som eksempelvis i Australien, Brasilien, Canada, Sverige og Grønland.

NØGLEBEGREBER

- Mineralforekomst
- Malmbjergart
- Magmatiske forekomster
- Hydrotermale forekomster
- Sedimentære forekomster
- Tungsandsforekomster
- Residualforekomster
- Kobbermalm
- Laterit
- Bauxit
- Inddampningssøer
- Jernmalm
- Geologisk miljø

REFERENCER

Bradley, D., Munk, L., Jochens, H., Hynek, S., & Labay, K. (2013). *A Preliminary Deposit Model for Lithium rines* (Nr. Open-File Report 2013–1006). Hentet fra <https://oneworldlithium.com/wp-content/uploads/2017/12/OF13-1006-USGS-lithium-model.pdf>

Elias, M. (2002). Nickel laterite deposits-geological overview, resources and exploitation. *Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploration*. CODES Special Publication, 4, 205–220.

Encyclopædia Britannica. (1999). Placer deposit. Hentet fra <https://www.britannica.com/science/placer-deposit>

Skinner, B. J., & Porter, S. C. (1987). *Physical Geology*. John Wiley & Sons.

Sørensen, H. (1989). *Råstoffer: Forekomst, forarbejdning, forbrug, forsyning i fremtiden*. Geografforlaget.

USGS. (2005). Major mineral deposits. Hentet fra <https://mrdata.usgs.gov/major-deposits/map-us.html>