

KAPITEL 14



FIGUR 108. Salar de Atacama i Chile. Bunker af lithium udvundet ved inddampning af lithium-rige opløsninger i saltsøer i Atacamaørkenen. Shutterstock.

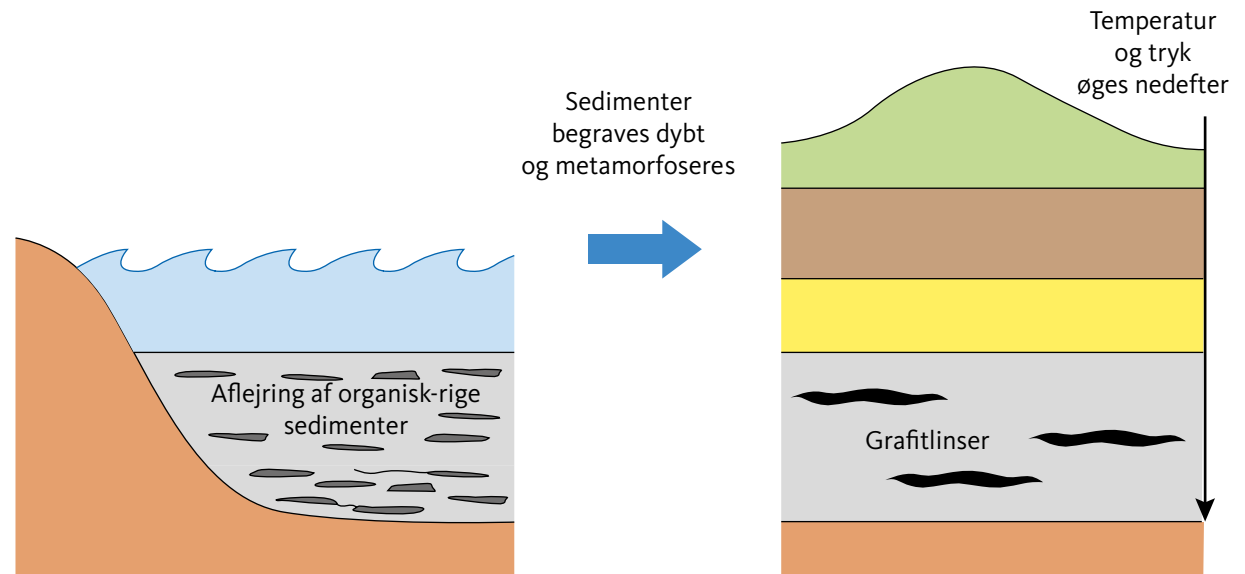
BATTERIERNES RÅSTOFGEOLOGI

BATTERIERNES RÅSTOFGEOLOGI

Alle råstoffer, der indgår i batterier, kommer fra miner fordelt over hele verden. Råstofferne er dannet i vidt forskellige geologiske processer og på forskellige tider igennem den geologiske historie.

GRAFIT

Mineralet grafit består af rent kulstof. Kilden til kulstof er fossilt organisk materiale, hvor kulstofrigt organisk materiale har været aflejret i sedimentære lag, der under tektoniske pladebevægelser senere er blevet trykket ned i Jordens skorpe. Hvis disse sedimenter på et senere tidspunkt i den geologiske udvikling udsættes for metamorfose (omdannelse under tryk og høj temperatur), kan det organiske kulstof blive omdannet til grafit. Metamorfosen sker fx som led i en bjergkædefoldning, hvor bjergarterne føres ned på dybder, hvor temperatur og tryk er høje nok til at danne grafit (figur 109). Grafit, der er dannet på denne måde, vil ofte have lidt andre grundstoffer indlejret i krystalstrukturen. Ved varmepåvirkning kan kulstof blive mobiliseret i en egentlig smelte eller fluid, som senere kan udfælde og danne årer



af grafit i en bjergart, hvor smelten størkner i sprækker. Her vil grafitten ikke have urenheder fanget i krystallerne.

De bjergarter, man udvinder grafit fra, har været igennem mange led i det geologiske kredsløb, fra sedimentation til højtemperaturmetamorfose og senere landhævning, hvor de overliggende bjerge er eroderet væk. Sådanne store ændringer i den geologiske cyklus tager mange millioner år. Når geologerne skal lede efter nye grafitforekomster, leder de særligt i områder, som er dannet

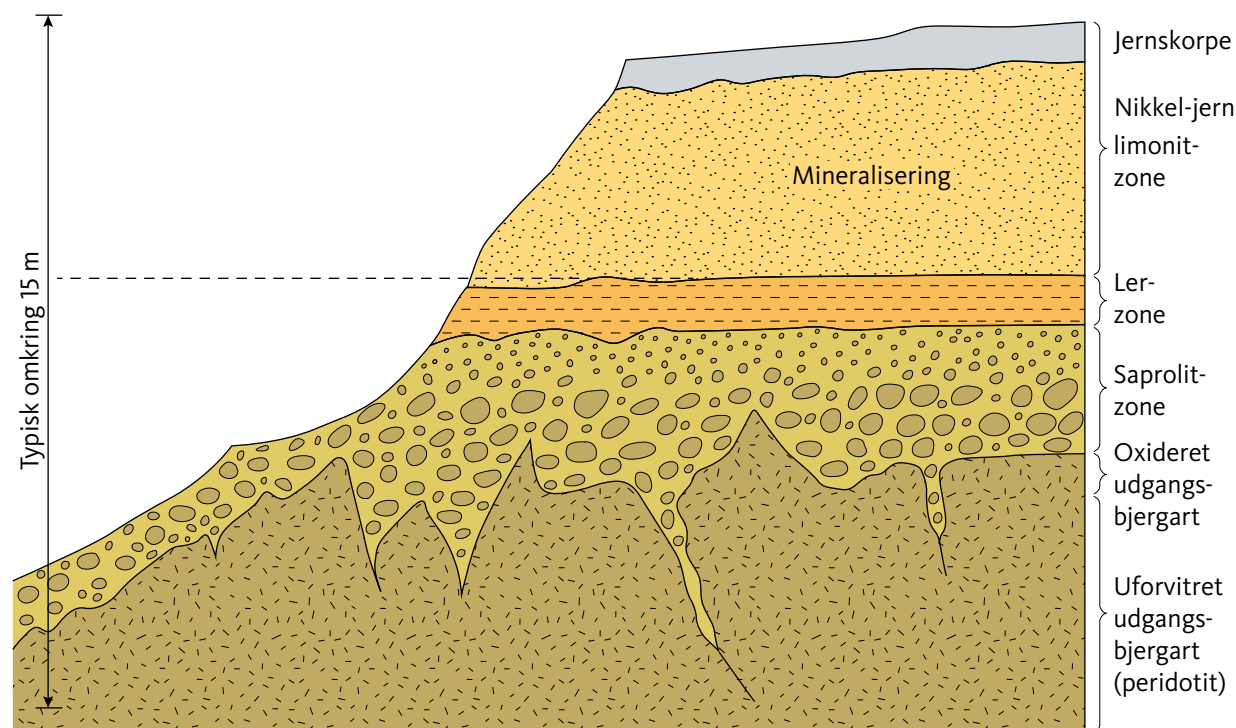
FIGUR 109. Hvis sedimenter med højt indhold af organisk materiale udsættes for højt tryk og temperatur metamorfoseres mineralerne, og herved omdannes det organiske materiale til grafit. Af MiMa (2019).

i den geologiske periode Proterozoikum (2.500-600 mio. år), fordi erfaringer viser, at der i denne periode blev dannet særligt mange grafitforekomster.

Grafit brydes både i underjordiske og i åbne miner. De fleste af dem bryder mindre end 20.000 ton om året, hvilket er ret små miner. Det skyldes, at grafit findes mange steder i verden og derfor brydes mange steder, og at grafit typisk findes i tynde årer og derfor ikke er egnet til meget store maskiner. Selv om der er stigende efterspørgsel på grafit på verdensmarkedet, kan det ikke afsættes i ubegrænsede mængder.

KOBOLT

I det periodiske system er kobolt nabo til nikkel og kobber, hvilket betyder, at de tre grundstoffer har mange kemiske fællestræk (størrelse og ladning). Derfor kan kobolt indgå i samme kemiske processer og mineraler som netop de to, og mange nikkel- og kobbermineraler indeholder også lidt kobolt, hvilket er grunden til, at kobolt brydes som biprodukt til nikkel og kobber. Nikkel og kobber kan koncentreres som malm i flere forskellige geologiske miljøer.



I Zambia og DR Congo findes der mange miner, der udvinder kobber, som stammer fra udfældning i et sedimentært bassin dannet for 880-550 mio. år siden. Mens sedimenterne i bassinet endnu ikke var hærdede og derfor stadig var permeable (gennemtrængelige), strømmede såkaldte bassin-fluider igennem de sedimentære lag. En bassin-fluid er vand, der cirkulerer i sedimenterne og op-

FIGUR 110. Geologisk snit gennem en nikkel-laterithorisont i en ultramafisk bjergart.

Jernskorpen, limonitzonen, lerzonen og saprolitzonen er alle udviklet ved forvitring og udvaskning (når stoffer transporteres væk af regnvand) af den nederste udgangsbjergart. Udgangsbjergarten er peridotit som indeholder <1 % nikkel og ca. 100 ppm kobolt.

Efter Samama (1986).

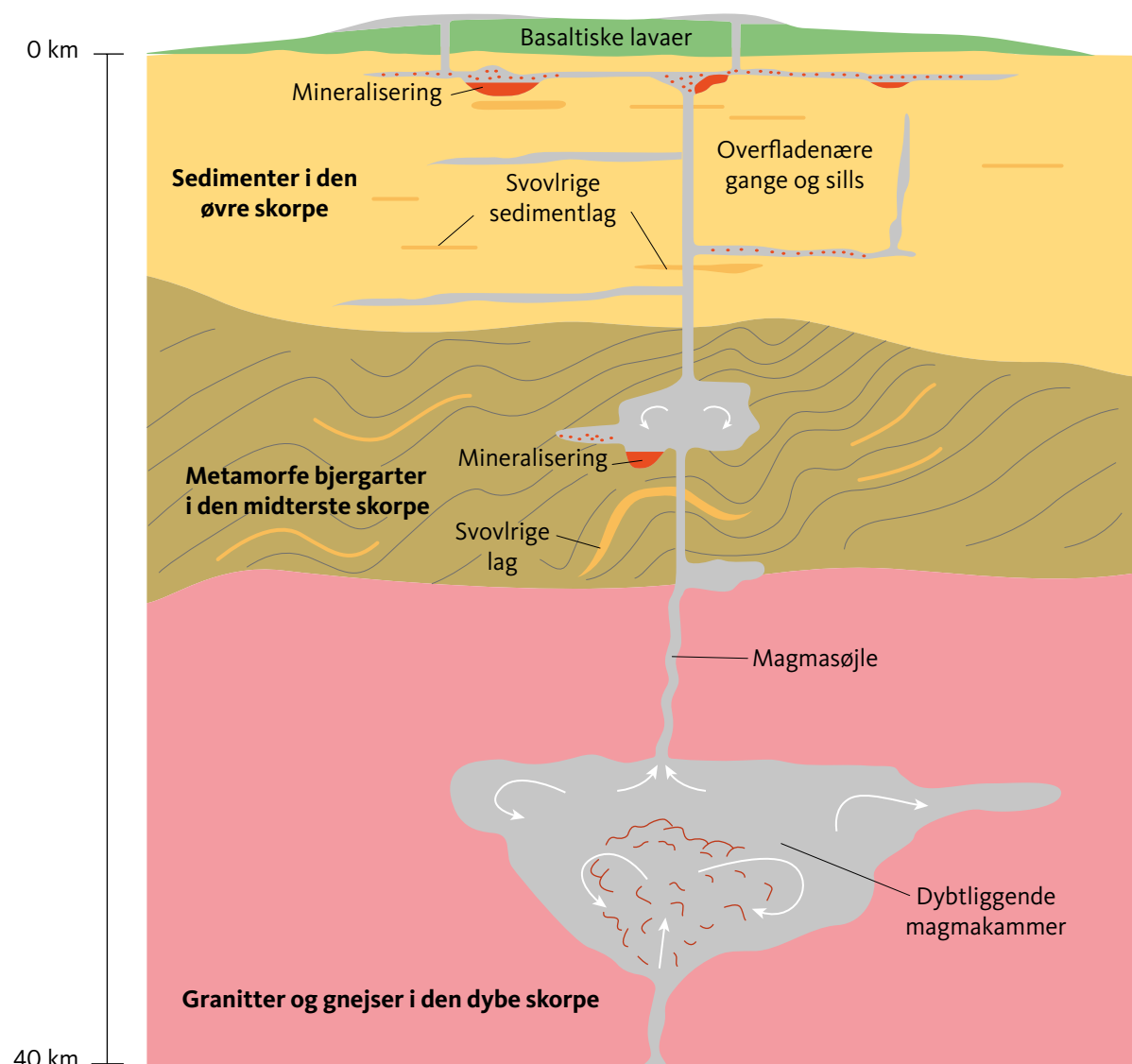
løser forskellige stoffer på sin vej. Især under kompaktion (det pres bjergarter udsættes for, når der gradvist aflejres flere kilometer af sedimenter ovenpå) frigives der mange stoffer fra sedimenterne. Væsken bevæger sig især langs forkastninger og breder sig ud i permeable lag af fx sandsten. Hvis fluiden er oxideret (kemisk tilstand, som gør stoffer mere egnede til at afgive elektroner og danne ioner), kan den indeholde sulfat og forskellige metaller, heriblandt kobber, som er opløst i væsken. Hvis væsken rammer et reduceret (det modsatte af oxideret, altså en kemisk tilstand hvor metallerne optager elektroner og danner forbindelser med fx svovl) sedimentlag, vil metalionerne udfældes. Et lag med højt organisk indhold vil have reducerede og iltfri forhold, og der vil være masser af svovl. Så når fluiden med opløste metaller rammer det organisk-rige lag, vil kobber binde sig til svovl.

Forsimpelt kan man sige, at væsken bærer opløste metalioner, indtil de møder svovlrige lag og danner malmminerale.

NIKKEL

Nikkel forekommer i to meget forskellige typer af nikkelmineraliseringer: sedimentæ-

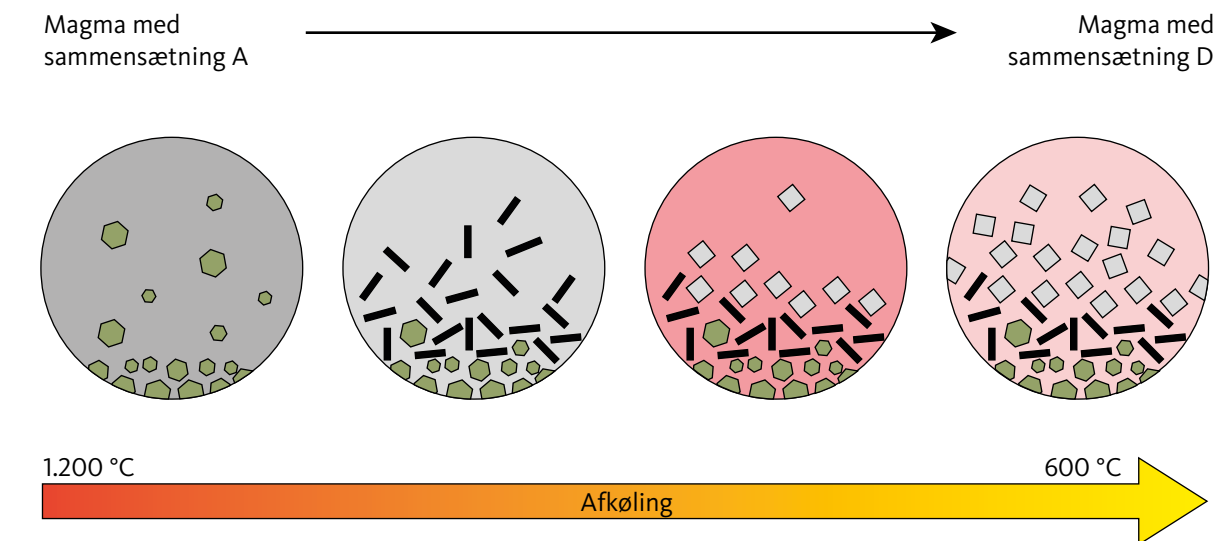
FIGUR 111. Dannelsen af nikkelforekomster i et magmatisk system. Svovl optages i magmaet, når magmaet kommer i kontakt med svovlrige sedimentlag. Svovlen 'suger' bl.a. nikkel til sig og udskiller sig fra resten af magmaet. På grund af høj densitet falder nikkelsulfiderne til bunds i magmaet og krystalliserer som en nikkelrig malm. Af MiMa (2019).



re (laterit) og magmatiske nikkelforekomster.

Nikkel-laterit-forekomster kan dannes som følge af kemisk forvitring af nikkelholdige, ultramafiske bjergarter (**figur 110**). Denne forvitring foregår over mindst 1 mio. år og kan kun foregå i tropiske klimazoner med høj luftfugtighed og nedbør. Her fører en intens kemisk forvitring af jordoverfladen til, at de mere letopløselige stoffer udvaskes og fjernes, mens de uopløselige forbliver tilbage i en laterit. Som følge af dannelsesmetoden vil lateritforekomster kun forekomme i de øverste få meter af jordoverfladen, men de kan til gengæld dække et stort areal. Lateritforekomster findes hovedsageligt på breddegrader mellem 25° N og S.

Magmatiske nikkelforekomster er, som navnet antyder, nikkelforekomster i magmatiske bjergarter. Langt det meste af Jordens nikkel befinder sig i Jordens kerne, som hovedsageligt består af jern og 5 % nikkel. Jordens kappe indeholder i gennemsnit kun 0,2 % nikkel, mens skorpens indhold i gennemsnit er så lavt som 0,01 %. Dannelsen af et magma, som er rigt på nikkel, skal ske i kappen, fx i forbindelse med en aktiv pladegrænse eller et hotspot. Hvis der her sker en delvis



opsmeltning af kappen, dannes en siliciumsmelte med indhold af SiO_2 (siliciumdioxid) og andre grundstoffer (**figur 111**). For at få nikkel og andre metaller til at koncentrere sig i en separat smelte, skal der være svovl i magmaet, da nikkel foretrækker at danne mineraler med svovl frem for silikat. Svovlet kan stamme fra fx skorpemateriale med højt organisk indhold. Når silikatsmelten møder svovlet, vil nikkel 'suges' ud af silikatsmelten og danne nikkel-sulfidmineraler i den svovlholdige smelte (**figur 111**). Svovl- og silikat-smelten er ikke umiddelbart blandbare og vil

FIGUR 112. Fraktioneret krystallisation. Når et magma afkøles, møder de forskellige mineraler deres størkningstemperatur gradvist, hvilket bevirker, at de krystalliserer og udfælder; først krystalliserer olivin (grøn), pyroxen og amfibol (sort), senere udfældes feldspat og kvarts (grå) og til allersidst vil man have et magma, der er koncentreret i kvarts og grundstoffer, der ikke passer ind i de nævnte bjergartsdannende mineraler. Det drejer sig især om grundstoffer med stor ion-radius, som fx de sjældne jordartsmetaller, lithium, niobium og zirkonium. Af MiMa (2019).

derfor størkne hver for sig. De metalholdige sulfidminerale er desuden tunge og vil ofte synke til bunds i magmaet og danne nikkel-rige lag.

LITHIUM

Lithiumforekomster kan ligeledes dannes på to måder: magmatisk og sedimentært (figur 113. b, c).

Lithiumpegmatitter

Når et magma begynder at størkne, dannes der mineraler afhængigt af magmaets kemiske sammensætning. I starten størkner de mest almindelige silikatminerale i en særlig rækkefølge (figur 112). Først krystalliserer de mørke Ca-, Fe- og Mg-rige mineraler og senere de lyse Na-, Al- og K-rige mineraler. Når alle disse almindelige mineraler er størknet, kan der forblive en restsmelte. I restsmelten findes de særlige grundstoffer, som passer dårligt ind i de almindelige mineraler på grund af deres store ion-radius. På den måde vil den resterende smelte løbende blive mere og mere koncentreret med disse særlige stoffer. Der kan være tale om grundstoffer som bly, zink, tin, lithium, de sjældne jordartsmetaller, beryllium, zirko-

FIGUR 113. Miner for batterimineraler.

A. Nkomati nikkel-lateritmine i Sydafrika bryder nikkel fra en magmatisk nikkelforekomst.

B. En af Galaxy Resources Limiteds miner som bryder lithiumholdige mineraler fra en magmatisk forekomst, Ravensthorpe, Western Australia.

C. Lithium-brine-mine. Her ses, hvordan man udvinder lithiumrige salte fra saltsøen Salinas Grandes i Jujuy, Argentina.

Fotos fra Shutterstock.

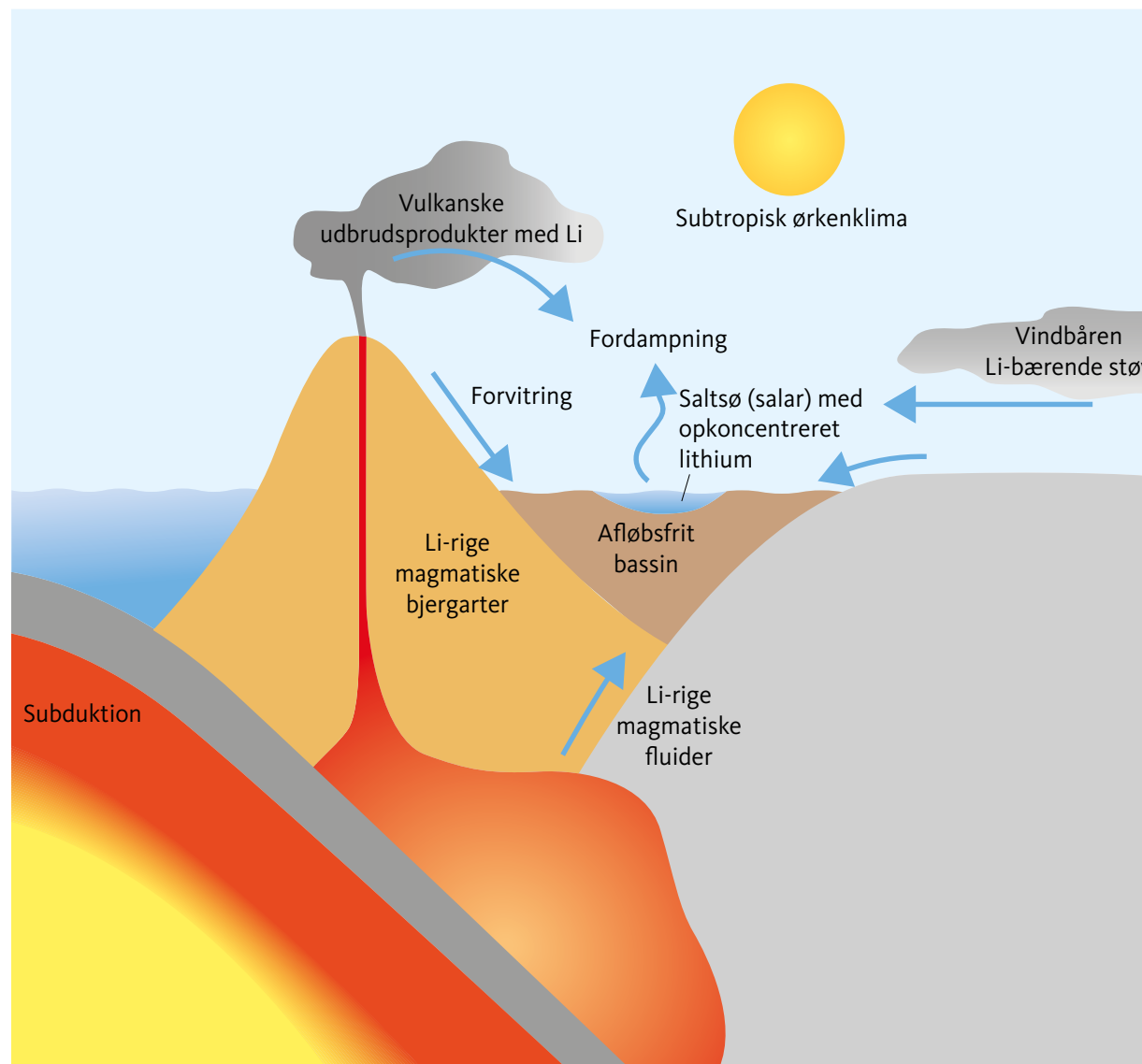


nium og niobium. Men også flygtige stoffer som vand, kuldioxid, fluor og klor findes i restsmelten. På grund af sit indhold af vand og kuldioxid vil restsmelten være meget tyndtflydende og have et lavere smeltepunkt end den resterende smelte. Mineralerne kan let vokse i det meget tyndtflydende magma og bliver derfor til meget store mineraler. Magmaet trænger typisk ind i sprækkezoner og danner gange. Sådanne bjergarter kaldes pegmatit og er grovkornede bånd og gange i en magmabjergart. Denne type lithiumforekomster findes mange steder i verden, men især i Australien er der store forekomster, stor efterforskning og en betydelig udvinning.

Lithium-brines

En anden måde lithium kan opkoncentreres til økonomisk rentable forekomster er gennem inddampning af søvand i særligt lithiumrige miljøer (figur 114). Søvandet er ikke almindeligt ferskt søvand, men saltopløsninger, som er opstået gennem mange års inddampning og kun et lille årligt tilløb af ferskt regnvand. Det forudsætter afløbsfrie søer, som kun opstår sæsonmæssigt, dvs. at de tørrer delvist ud i løbet af året. Søerne

FIGUR 114. Geologisk, landskabsmæssig og klimatisk model over saltsøer i Andesbjergenes bagbuebassiner, altså det bassin der dannes på bagsiden af den vulkanske ryg. Aflukkede søer, der dannes i et tørt klima, vil hvert år udtørre, og de salte, der findes opløst i søvandet, vil udfældes. Hvis denne sø findes i et område med naturligt højt lithiumindhold, vil lithium kunne koncentreres til en økonomisk rentabel forekomst. Af MiMa (2019) efter Hodson (2015).



skal være i kontakt med en bjergart, som har forhøjet indhold af lithium, og som i kombination med geotermisk aktivitet (fx et område med underliggende magmakamre) kan bringe lithium op, hvor det opløses i søvandet. Når vandet fordamper, udfældes salte, bl.a. lithiumcarbonat. Hvis denne cyklus af opløsning i søvand, fordampling og udfældning af salte får lov at foregå over lang tid, vil der kunne ophobes betydelige mængder lithiumsalte.

Lithiumrige saltsøer er bedst kendt fra Andesbjergene, hvor de kaldes en 'salar'. I en salar udfældes hovedsagligt almindeligt salt (NaCl). Når det er udfældet pumper mineselskabet den resterende opløsning ind i mindre kar og lader disse udtørre.

De udfældede salte i karrene vil have en høj koncentration af lithiumcarbonat (Li_2CO_3), som man let kan opsamle. De talrige søer i Andesbjergene er særligt egnede til dannelse af denne type lithiumforekomster, fordi der er en aktiv subduktionszone med vulkanisme, som giver masser af geotermisk aktivitet. Desuden befinder bjergene sig i den tørre, subtropiske klimazone, hvor der er høj fordampling.

NØGLEBEGREBER

- Grafit
- Kobolt
- Nikkel
- Lithium
- Malmforekomst
- Geologisk proces

REFERENCER

- Hodson, H. (2015). Lithium dreams: The surreal landscapes where batteries are born. Hentet fra <https://www.newscientist.com/article/mg22830430-300-lithium-dreams-the-surreal-landscapes-where-batteries-are-born/>
- Samama, J. C. (1986). *Ore fields and continental weathering*. Van Nostrand Reinhold Company New York.