

Evolusjon i spennet mellom geologi og biologi

Rune S. Selbekk & Markus Lindholm

Når en hører ordet evolusjon tenker de fleste på biologisk evolusjon, men livets utvikling har også bidratt til en form for mineralogisk evolusjon på vår klode, som vi først nylig er blitt klar over. Geologer har oppdaget at dannelsen av mange bergarter og mineraler allerede tidlig i jordens historie ble influert av både uorganiske prosesser og biologiske prosesser. Faktisk ville mye av mineralriket aldri ha oppstått om ikke livet hadde utviklet seg som det har gjort. På den annen side hadde heller ikke livet utviklet seg slik det har gjort uten de geologiske prosessene. Mange glemmer at dagens naturmangfold er avhengig av topografi og jordsmonnet, som igjen influeres av næringstilførselen fra de underliggende bergartene og mineralene.

Utviklingen av livet og det store mangfoldet av mineraler er en parallell evolusjonshistorie som har vekselvirket gjennom store deler av jordens historie. Vitenskapsmenn som Hazen et al. (2008) antar at minst 2/3 av verdens over 4600 kjente mineraler er direkte eller indirekte relatert til biologiske prosesser.

Dette perspektivet tilfører også mineralogien en ny dimensjon. Mineralsk evolusjon er helt klart forskjellig fra den seleksjonsmekanismen som er sentral for biologisk evolusjon. Mineraler muterer ikke, reproducerer eller konkurrerer ikke slik som levende organismer. Til gjengjeld har mangfoldet og dannelsen av enkelte mineralgrupper forandret seg drastisk gjennom jordas 4,5 milliarder år. En kan inndeले den mineralogiske evolusjonen i tre hovedfaser: 1) Urtidens mineralogi da solsystemet ble dannet (>4,5 milliarder år); 2) Skorpe- og manteldifferensiering og platetektonikk (4,5-2,5 milliarder år); 3) Biologisk påvirkede mineraldannelser (<2,5 milliarder år).

Innenfor denne inndelingen kan en lage enda flere underdeler. Flere av disse vil overlappe i tid. Hazen et al. (2008) foreslår en inndeling i ti ulike utviklingsfaser.

1. Planetarisk mineralogi

Alle de kjemiske elementene var til stede ved starten av vårt solsystem som støv, men dannet relativt få mineraler. Bare store masser som solen og planetene skapte muligheten for større variasjon i mineralriket, i form av ekstreme temperaturer og trykk. Det er nødvendig for å danne en viss variasjon i antall mineraler. Svært mange elementer var også for "sjeldne" eller uttynnet til å danne mineraler når det befant seg i verdensrommets støvskyer.

Vi regner med at solsystemet utviklet seg gjennom en form for "gravitasjonsklumping" av små uddifferensierte masser. Fragmenter som i dag forekommer som meteoritter, samlet seg til skyer, som gradvis fortettet seg videre til mer eller mindre faste himmellegemer. Det er funnet 60-70 forskjellige mineraler i slike primitive meteoritter. I mer utviklede meteoritter er det til nå påvist mer enn 250 forskjellige mineraler. Store planeter, spesielt de med vulkansk aktivitet og muligheter for tilstedeværelse av fritt vann, kan gi grunnlag for dannelse av et enda større kjemisk-mineralsk mangfold. En antar for eksempel at Mars og Venus kan ha så mye som 500 forskjellige mineraler i overflatebergartene.

Men bare vår egen klode har en kjemisk-mineralogisk evolusjon som har gått til et høyere stadium når det gjelder mineraldannelser. En viktig forutsetning var trolig dannelsen av en planetkjerne, og platetektonikken på overflaten, med sine langsomme forandringer av kontinenter og havbunnen over tid. Platetektonikken medførte helt nye kjemiske og fysiske miljøer hvor nye mineraler kunne dannes.

Det som likevel i størst grad skulle komme til å fremme det mineralogiske mangfoldet, var dannelsen av liv for ca 4 milliarder år siden. Mange mineraler er et resultat av oksygenrik atmosfære, inkludert jern-, kobber- og andre malmer, og dette oksygenet stammer etter hva vi vet kun fra fotosyntetiserende bakterier og alger.

Det solsystemet som tok form for 4,57 milliarder år siden - så vidt vi vet skjedde det gjennom svermer av asteroider - oppsto på grunnlag av om lag tolv ulike mineraler. Dette er så å si "ur-mineralene" som fortettet seg til de forskjellige planetene i solsystemet vårt. "Dette er de mest primitive mineralene – råmaterialet som det hele begynte med" (Hazen et al. 2008). I denne første fasen var det høy vulkansk aktivitet både på jorden og på andre planeter, og det dannet seg også vann og flytende væsker. Etter den tidlige størkningen av skorpen oppsto nye mineraler i jordskorpen ved gjentatt oppsmelting, separasjon, krystallisasjon og re-krystallisasjon. Dermed økte antallet mineraler til om lag 250. Blant disse mineralene finner vi olivin, titanitt og zirkon. De andre planetene i solsystemet som er mineraliserte på lignende måte som jordkloden – Merkur, Venus og Mars – har blitt til i denne tilstanden, og mineralene man finner i meteoritter indikerer også at universet for øvrig i all hovedsak består av disse mineralene. Heller ikke på månen foregår det geologiske prosesser som på noe vis ligner dem vi har rundt oss på jorden. Månen er på sett og vis et nærmest dødt geologisk objekt.

Det "kosmiske mineralsamfunnet" som jorden hadde felles med de øvrige planetene er imidlertid ganske ulikt det vi finner her i dag. Kvarts, feltspat og glimmer, som er svært utbredt på jorden, finnes praktisk talt ikke i meteoritter, og er trolig ekstremt sjeldne både i solsystemet og i universet for øvrig.

2. Skorpe- og manteldifferensiering og platetektonikk

Den videre utviklingen av jordskorpen kjennetegnes av det man kan kalle "differensiering", med stadig økende lokale forskjeller i geologi, kjemi og mineralogi. Markerte temperaturforskjeller mellom overflaten og jordens indre forsterket separasjonen av grunnstoffer og forbindelser som har ulikt smeltepunkt, kondensasjonspunkt eller tetthet, eller som får ulike fysiske egenskaper (f. eks ulik viskositet) når de varmes opp. På den måten kom det til ytterligere separasjon av forbindelser med ulike fysiske-kjemiske egenskaper, og over tid fikk hvert sted en mer og mer særegen geokjemisk historie og profil.

Differensieringen gjorde at det ytterste laget, lithosfæren, fikk en svært annerledes kjemi enn sonene i jordens indre. På overflaten akkumulerte silisium og aluminium, som fortsatt dominerer de øverste lagene av jordskorpen. De dypere delene ble anriket med tyngre stoffer, særlig jern og nikkel. Overflaten tok form av et antall platelignende kontinentlegemer, som var bevegelige, om lag som store isflak på en innsjø. Disse kontinentlegemene har stadig skiftet størrelse og form, og gjør det fortsatt. Fra tid til annen samlet alle seg til et såkalt superkontinent, før de igjen drev fra hverandre vekk fra hverandre. Dette har skjedd minst 6-8 ganger gjennom jordens historie. Man snakker om en "kontinentenes dans", der kontinentene vekselvis samler seg til ett stort kontinent, for så igjen å drifte fra hverandre. Det kan tenkes at dansen til og med har et visst rytmisk preg, der superkontinenter har oppstått med en viss regularitet i intervaller på om lag 500 millioner år (for 2600, 2100, 1700, 1100, 650 og 250 millioner år siden). Platetektonikken er en særdeles viktig faktor i jordens utvikling siden dette medfører dannelsen av høye fjellkjeder og dype subduksjonssoner (hvor platen går til grunne). At plater kolliderer førte til dannelsen av høye fjellkjeder, som så ble eksponert for forsterket forvitring, og som i sin tur førte til lokal akkumulering av sedimenter og kjemiske løsninger i de tilhørende bassengene i havområdene rundt. Fjellkjedene ble også viktige faktorer for klimaforskjeller, noe som i sin tur fremmet regionale forskjeller mellom organismesamfunnene som var under utvikling. I dyphavsgrøfter, for eksempel langs soner der havbunn skyves ned ved subduksjon, ble andre forvitningsprodukter og stoffer oppkonsentrert. Når dette ble trukket ned i jordskorpen, gjerne også sammen med havvann som var anriket med ulike salter, førte dette til lokal oppsmelting og vulkanisme som i sin tur førte til lokale forskjeller i magmaets kjemiske og fysiske egenskaper. Disse prosessene førte til videre lokal differensiering, og ledet til en rekke nye mineraler og bergarter. For organismene som utviklet seg under disse

skiftende forholdene betyr dette at det stadig ble dannet nye potensielle habitater, mens andre gikk til grunne, og denne omskifteligheten har helt frem til i dag vært en motor for biologisk differensiering og dannelse av nye arter og økt biologisk mangfold, både i vann og på land.

Viktige bergarter, blant annet granitt, tok form i den samme perioden. Granitt oppfattes vel av mange som selve "ur-bergarten", og som symbolet på urtid og varighet, men granitt har så langt faktisk ikke vært påvist i universet for øvrig. Granitt er et ektefødt barn av jorden og av de forholdene som utviklet seg her. Med granitten oppsto også pegmatitter, der man finner mange av de "edle" og harde mineralene som turmalin, kvarts, beryll og topas. Andre mineraler som oppsto i den samme perioden var forbindelser mellom metaller og sulfider som pyritt, galenitt og sfaleritt.

3. Økende biologisk påvirkning av mineraldannelser

Fossile spor etter bakterier viser at det var liv på jorden allerede for 3,5 mrd år siden, kanskje også enda tidligere. Det er uklart hvor livet har hatt sin opprinnelse og hvordan det oppsto, men mulige spor etter primitive bakterier er kjent fra de aller eldste bergartene på kloden. Det betyr også at temperaturforholdene på overflaten allerede ganske tidlig har vært mer like dem vi har i dag. Også en del mineraler som oppsto på denne tiden avhenger av ganske lave temperaturer, og peker i samme retning.

For 3 milliarder år siden begynte imidlertid livet på jorden å påvirke den videre utviklingen og differensieringen av mineralriket. Stoffskiftet og metabolismen til kolonier av bakterier på havbunnen forskyvde den geokjemiske balansen i havvannet og i sedimentene, med lokal oppkonsentrering av bestemte grunnstoffer og enkle forbindelser (blant annet gasser som oksygen og karbondioksid), som ble trukket inn i jordskorpen og førte til ytterligere lokal biogeokjemisk differensiering, og nye lokale bergarts- og mineraldannelser. Den bakterielle aktiviteten på havbunnen førte til utfellinger av mangan- og jernoksider, som ga lagdelte sedimenter, både som magnetitt, manganitt og pyritt. Slike sedimenter, blant annet såkalt "banded iron formations", utgjør de hovedsakelige forekomstene av jern- og manganmalm, slik man for eksempel har i Australia, eller i de store jernforekomstene i Varanger. Også jernforekomstene på Elba i Italia, der hematitt forekommer med pyritt, har oppstått ved slik bakteriell aktivitet. Slike svære jernforekomster er altså av biogen opprinnelse. Også mange andre malmforekomster, assosiert med både gull, kobber, bly, tinn og sink, har sin rot i bakterielle prosesser. Gjennom disse biogeokjemiske endringene økte antallet mineraler i jordskorpen til anslagsvis 1500 stabile forbindelser.

Også planteriket var under full utvikling, i form av ulike encellede alger: "For to milliarder år siden var ikke landet dekket av skoger, tundra, myrer, enger og kratt. Grunne havområder derimot var dekket av det skimrende blågrønne og fiolette skummet av fotosyntetiserende bakterier, som dekket over lag på lag av gule, brune og mørke sjikt med anaerobe bakterier, uten klorofyll. Bakterielle legemer og nett av sopplignende tråder grodde mellom steinene. I havet fløt og svømte de, i luften drev deres sporer med vinden", skriver Lynn Margulis, en av forskerne på prekambrisk liv. Fotosyntesen førte til økende forskyvninger i sammensetningen av gasser i atmosfæren. Gradvis oppsto den atmosfæren som vi kjenner, med svært lave innhold av karbondioksid, men med høye konsentrasjoner av den svært reaktive gassen oksygen. Deler av dette ble ledet inn i det hydrologiske kretsløp og bundet opp i sedimenter på havbunnen. Store kolonier av encellede organismer som for eksempel blågrønnalger – såkalte stromatolitter – hadde verdensherredømme på jorden. Kalkutfellinger og lignende utfellinger med magnesium, barium og strontium førte til kalsitt, magnesitt, dolomitt, baryt og strontianitt, eller der svovel var til stede, til sulfat-utfellinger med gips, og i den forbindelse oppsto også mer pyritt, og også markasitt og andre sulfider. Også ulike salter, blant annet halitt (steinsalt), oppsto i slike sammenhenger.

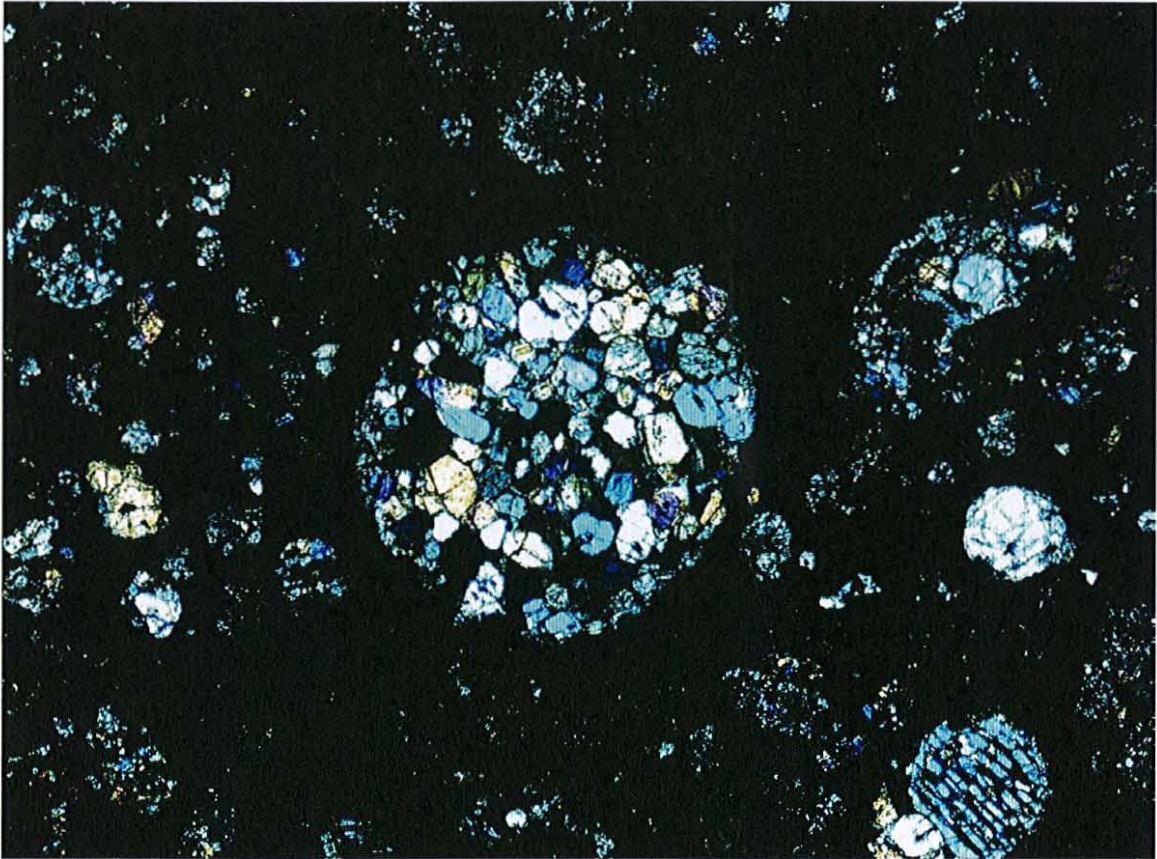


Fig 1. Kondrul i meteoritten fra Moss. Typisk eksempel på tidlig primitiv mineralogi.



Fig 2. 600 millioner år gamle stromatolitter fra Marokko. Den tids verdensherskere.

Mikroorganismer og planter forårsaker også økt nedbryting av bergarter med påfølgende produksjon av leirmineraler. Utviklingen med skjell og mineraliserte skjeletter genererte også tykke avsetninger av karbonater, noe som vil være uvanlig på en livløs planet.

I løpet av minimum de siste 2,5 milliarder år så har jordens liv og mineralogi utviklet seg med en parallell evolusjon. En indikasjon på dette er observasjonene av en begrenset variasjon i andre planeters og månens mineralogi. Dette styrker inntrykket av at biologiske faktorer har vært medbestemmende for dannelsen av det store mangfoldet av mineraler vi idag har på jorden.

Sene mineraliseringer

Oksidasjon og hydratisering la grunnen for en siste bølge av mineralske forbindelser, blant annet forbindelser av metalliske oksider og hydroksider, som jern, bly, kobber, mangan, sink eller kvikksølv. Videre oppsto nå en lang rekke såkalte "sekundærmineraler", som azuritt, malakitt, rhodokrositt og cerussitt. Dette er sulfater, karbonater og fosfater som fortsatt dannes i stort omfang der jordskorpen får kontakt med atmosfæren, særlig i fuktig-tropisk klima, hvor CO₂-anrikt jordvann kan trenge ned gjennom sprekker og angripe de primære sulfidene som hadde blitt dannet tidligere. Noen av de mest berømte mineralforekomstene på kloden, blant annet Tsumeb i Namibia, Lavrion i Hellas og Bou Azzer i Marokko, har oppstått slik.

Gjennom denne siste dannelsesbølgen, som er nært knyttet til klimatiske forhold og dermed i stor grad bestemt av biologiske prosesser, økte antallet mineraler ytterligere, til dagens antall, som er over 4600. Det har altså foregått en rik differensiering og evolusjon av hele mineralriket, der jorden har gått fra en relativ homogen situasjon, som opprinnelig var fysisk og kjemisk lik den vi finner i kosmos for øvrig, til en stadig tiltagende differensiering og lokalisering, der hvert sted fikk sine spesifikke geologiske miljøer, med sine særegne mineraldannelser. Dette preget av lokal differensiering finner man også igjen i selve landskapsformene, som er langt mer varierte og forskjellige fra sted til sted, enn det man finner på månen eller på våre naboplaneter. Landformene og overflate-relieffene på kloden er et stadig vekslende spill mellom indre krefter, som løfter den plastiske overflaten oppover, og ytre forvittringskrefter, som eroderer frem ulike karakteristiske lokale former fra utsiden. Om man sammenligner jorden med månens overflate, så ser man at sistnevnte i stor utstrekning er preget av nedslag fra meteoritter. Grunnen til at slike strukturer er så lite å se på kloden vår, er ikke at de ikke skjer her også, men at det dynamiske spillet mellom ytre og indre krefter på jorden visker dem vekk igjen etter kort tid. Slik har også hvert fjell og hver dal i Norge sin egen spesielle dannelseshistorie og form, og det gjenfinner man helt ned til mikronivå, til små søkk, knauser, fjellkløfter, holmer, skjær og bekkefar.

Sjeldne mineraler - freaks of nature?

Noen omtaler oppdagelse og beskrivelsen av nye mineraler som en slags frimerkesamling. Sjeldne eller uvanlige mineraler er kanskje ikke bare noen særheter for spesielt interesserte. Alle de 4600 mineralene er med på å fortelle noe om jordens utvikling, og spesielle og unike miljøer, som kanskje ikke eksisterer på andre planeter i vårt solsystem.

Nye mineraler kan være en nøkkel til løsning av enkelte av naturens gåter. "Små" ubetydelig mineraler blir ofte neglisjert av mange geologer, som mener at sjeldne mineraler bare er kuriosas.

Selv de mest uanselige mineraler med uvanlig kjemi og struktur gjenspeiler forholdene for dannelse av et mineral ved uvanlige fysiske eller kjemiske parametre. Disse små mineralene er også en del av minaralevolusjonen (Hawthorne 1993).

I tillegg så kan enkelte av disse mineralene ha kjemiske, fysiske og strukturelle egenskaper som kan anvendes innen ny teknologi med mer. Enkelte sjeldne mineraler er definitivt ikke unyttige i det lange perspektiv. Enkelte forskere har antydnet at vi kan ha opptil 15 000 mineraler her på jorden (Hazen et al. 2008, 2011), så her er det mye som kan oppdages.

Tabell. 1. Ti stadier av minerevolusjon av terrestriske planetene, med mulig timing på jorden, eksempler på mineraler, og anslag over akkumulert antall ulike mineraler fra Hazen et al. (2008). Alder i milliarder år (Ma).

Perioden med planetdannelse (>4.55 Ma)

1. Primære chondritmineraler, >4,56 Ma, Mg-olivine/pyroksener, Fe-Ni metall, FeS. Ca 60 mineraler.

2. Differensiering skorpe-kjerne >4,56 til 4,55 Ma. Ca 250 mineraler.

- a) forandringer som involverer vann: fyllosilikater, hydroksider, sulfater, karbonater, halit
- b) termisk endring: albitt, feldspatoider.
- c) sjokkfase: ringwooditt, majoritt, akimotoitt, wadsleyitt.
- d) achondritter: kvarts, K-feltspat, titanitt, zirkon.
- e) jernmeteoritter mange overganger metallsulfider og fosfater.

Perioden med skorpe og manteldifferensiering (4.55 to 2.5 Ma)

3. Vulkansk bergartsutvikling, 4,55 til 4,0 Ma. 350-500 mineraler.

- a) fraksjonering, feldspatoider og pyrobol (volatil-fattige planeter).
- b) vulkanisme, utgassing, overflatehydrering, hydroksider, leirmineraler (volatil-rike planeter).

4. Granitoider og granittdannelse, 4,0 til 3,5 Ma. Ca 1000 mineraler.

- a) granitoider, kvarts, alkalifeltspat (perthite), hornblende, glimmer, zirkon.
- b) pegmatitter, beryll, turmalin, spodumen, pollucite, mange andre.

5. Platetektonikk, >> 3,0 Ma. Ca 1500 mineraler.

- a) hydrotermale malmsulfider og selenider, arsenider, antimonider, tellurider og sulfosalter.
- b) metamorfe mineraler: kyanitt, sillimanitt, cordieritt, kloritoid, jadeitt, staurolitt.

6. Anoksisk biologisk verden, 03.09 til 02.05 Ma. Ca 1500 mineraler.

- a) metallutfellinger båndede jernformasjoner (Fe og Mn).
- b) karbonater, jernrike karbonater, dolomitter og kalkstein.
- c) sulfater, barytt, gips.
- d) evaporitter, halogenider, borater.
- e) karbonatrike skarnbergarte, diopsid, tremolitt, grossular, wollastonitt, skapolit.

Perioden med sterk biologisk påvirkning av mineralogien (>2.5 Ma til i dag)

7. Paleoproterozoikum, atmosfæriske endringer, 2,5 til 1,9 Ma. Ca 4000 mineraler. 2000 nye oksider/hydroksider, spesielt malmmineraler, mye overflateoksidasjon.

8. Intermediate hav, 1.9 til 1.0 Ma, minimal mineralogisk innovasjon. Ca 4000 mineraler.

9. Neoproterozoikum, biogeokjemiske endringer, 1,0 til 0,542 Ma. Ca 4000 mineraler.

- a) istid, omfattende isdeponering, men få nye mineraler.
- b) siste istid, oksidasjon, omfattende oksidativ forvitring av alle steinene på overflaten.

10. Phanerozoikum, 0.542 Ma frem til i dag. 4600+ mineraler.

- a) biomineralisasjon med omfattende skallskjeletter av kalsitt, aragonitt, dolomitt, apatitt, og opal.
- b) bio-forvitring, økt produksjon av leirmineraler, jordsmonn.

Merk: Flere av disse stadiene overlapper og flere av stadiene pågår den dag i dag.

Referanser

GREW, E.S., BADA, J.L. & HAZEN, R.M. (2011): Borate minerals and origin of the RNA world. *Origin of Life and Evolution of Biospheres* **41**, 307-316.

HAZEN, R.M., PAPINEAU, D., BLEEKER, W., DOWNS, R., FERRY, J.M., MCCOY, T.J., SVERJENSKY, D.A. & YANG, H. (2008): Mineral evolution. *American Mineralogist* **93**, 1693-1720.

HAZEN, R.M., BREKKER, A., BISH, D.L., BLEEKER, W., DOWNS, R.T., FARQUHAR, J., FERRY, J.M., GREW, E.S., KNOLL, A.H., PAPINEAU, D., RALPH, J.P., SVERJENSKY, D. A. & VALLEY, J. (2011): Needs and opportunities in mineral evolution research. *American Mineralogist* **96**, 953-963.

HAWTHORNE, F. (1993): Minerals, mineralogy and mineralogist; past, present and future. *Canadian Mineralogist* **31**, 253-296.

Referanse til denne artikkel:

Selbekk, R.S. & Lindholm, M. (2012): *Evolusjon i spennet mellom geologi og biologi. Norsk Bergverksmuseum, skrift 49, 65-71.*