



Claus Østergaard

Guld er det mest eftertragtede af alle metaller og fascinerer alene af den grund de fleste. En kombination af sjældenhed og skønhed har resulteret i øget efterspørgsel gennem de sidste 5.000 år, og nye anvendelsesmuligheder ser stadigt dagens lys. Guld har til alle tider været brugt i kunsthåndværk og udsmykning, men har også haft stor betydning som betalingsmiddel og er i moderne tid blevet et vigtigt element i industrien, f.eks. indenfor elektronikindustrien. Økonomisk og handelsmæssigt har guld stor betydning som garant for nationaløkonomisk troværdighed, en betydning der dog er aftagende.

På trods af den store anvendelighed og betydning var man næsten uvidende om gulds geokemiske egenskaber indtil midten af dette århundrede, hvilket resulterede i en mangelfuld systematisering af guldforekomster. De seneste årtier har dog bidraget til en øget forståelse af gulds kemi og dermed til guldmineraliseringer.

Forekomstmåde

Gulds variation med hensyn til mineralogi og kemi (se boks 1) afspejler sig i de forskellige forekomster af guld. Metallisk guld og guldførende mineraler optræder i en lang række geologiske miljøer og dertil hørende strukturer og bjergarter. Af hovedtyper kan nævnes:

(I) Placer eller tungsandsforekomster, det vil sige forekomster, der findes i flod- og kystmiljøer, hvor guld er opkoncentreret sekundært i sand og grusaflejringer.

(II) Hydrotermale forekomster, der efter dannelsestemperaturen kan inddeles i:

(a) Mesotermale forekomster, der ofte optræder langs bevægelsessystemer i prækambriske grønstensbælter, og som dannes ved ca. 200-500° C.

(b) Epitermale forekomster, der er mineraliseringer dannet ved relativt lav temperatur (50-300° C) som et resultat af hydrotermal lavtemperatur aktivitet ved jordens overflade.

(III) Intrusions-relaterede forekomster, hvor bl.a. processer i magmakamre er ansvarlige for opkoncentreringen af gullet.

Ofte er guldforekomster dannet som en kombination af flere processer, og ovennævnte klassifikation er derfor en forenkling af de faktiske forhold. Et par eksempler skal nævnes i det følgende for at give et indblik i forskellige forekomsters geologi.

Boks 1

Gulds kemi og mineralogi

Guld-Au

Atomnummer	79
Atomvægt	197 g/mol
Densitet	19,3 g/cm ³
Hårdhed	2° - 3
Smeltepunkt	1063°C
Foretrukne oxidationstrin	0, I, III, (II, IV, V, VII)
Krystalssystem	kubisk
Krystalklasse	4/m32/m (Fm3m)

Guld findes i det periodiske system (undergruppe IB) sammen med kobber og sølv, som guld derved har en række kemiske træk fælles med. Som det mest elektronegative af alle metaller har guld en særdeles god evne til at tiltrække elektroner. De hyppigst forekommende guldminerale er de såkaldte tellurider, hvor guld optræder i kombination med andre metaller, som f.eks. tellur, sølv, bly og antimon. I mange forekomster findes guld endvidere i ren metallisk tilstand og er repræsenteret som enkeltkrystaller eller som uregelmæssige indeslutninger i bl.a. arsenopyrit, pyrit (svovlkis) eller chalkopyrit (kobberkis).

Placer eller tungandsforekomster (Witwatersrand)

Witwatersrand forekomsten i Sydafrika er et eksempel på en såkaldt tungandsforekomst eller placer. Placerforekomster er af enorm økonomisk betydning og har gennem historisk tid udgjort ca. 2/3 af verdens samlede guldproduktion. Ordet 'placer' er af spansk oprindelse og blev benyttet af de første spanske guldgravere i Nord- og Sydamerika om guldforekomster fundet i sand- og grusaflejringer dannet i flodløb. Her forekommer guldet som sekundære aggregater, der hovedsageligt ved hjælp af vand er skyllet ud af den oprindelige bjergart og derefter opkoncentreret i flodlejer eller kystmiljøer. Placerforekomster er særdeles attraktive, da de ofte indeholder store koncentrationer af guld og samtidig er relativt billige at udvinde sammenlignet med teknologisk krævende underjordiske åre-mineraliseringer.

I Witwatersrand findes nogle af verdens største og mest kendte guldforekomster. Området er prækambrisk (arkæisk alder, 3.000-2.700 millioner år) og består af kilometertykke flod- og kystsedimenter. Størstedelen af forekomsterne er placeret i den såkaldte 'Centrale Rand Gruppe', en op til 3 kilometer tyk bjergartsserie, der består af grovkornede umodne sandsten. I disse sandsten ses mindre enheder af konglomerat og kvartsrige sandsten, hvori de enkelte placerforekomster optræder. Størstedelen af guldet fra Witwatersrand er aflejret direkte i turbulent vand, men senere metamorfose i grønskiferfacies menes at have omfordelt 5-40 % af det oprindelige guld.

Mesotermale forekomster (Mother Lode forekomster)

De californiske Mother Lode forekomster er blandt verdens mest kendte mesotermale forekomster, og er samtidigt typelokalitet for en række tilsvarende mineraliseringer andre steder på jorden. Mother Lode guldmineraliseringer optræder i massive kvarts- og karbonatårer (åreguld), hvor sidestenen ofte er hydrotermalt omdannet til finkornet lys glimmer (sericit), karbonat- og/eller albit-rige bjergarter. Der er for det meste tale om relativt rene kvarts-guld mineraliseringer, der er fattige på metaller som f.eks. bly, zink og kobber.

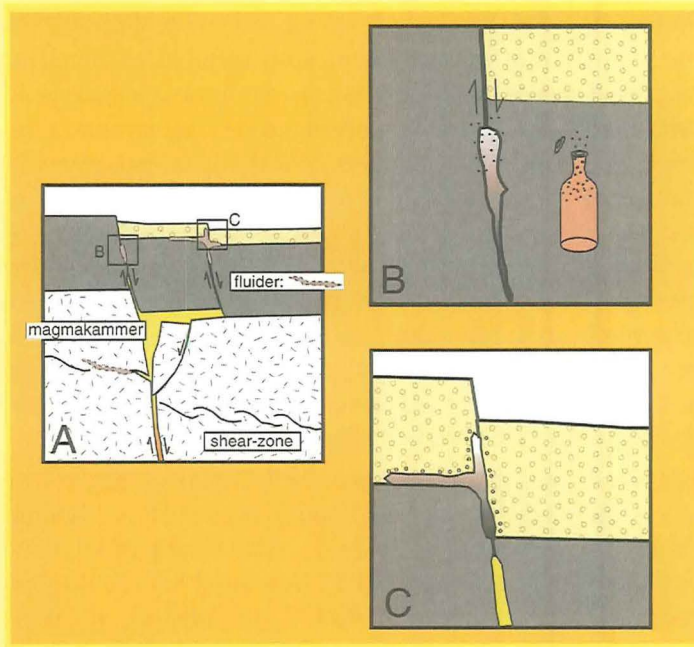
Kvarts-guld forekomster af denne type ses hyppigt i prækambriske grønstensbælter, hvor værtsbjergarten kan være vulkanske bjergarter

som basalt eller andesit, der er metamorfoseret i grønskifer- eller amfibolitfacies. Yngre tilsvarende forekomster findes også langs yngre tektonisk aktive pladegrænser, hvor plutoniske kvartsrige bjergarter som granit, granodiorit og tonalit giver ophav til dannelsen af guldførende opløsninger. Et gennemgående træk ved mesotermale åre-mineraliseringer er tilknytningen til større eller mindre shear- og forkastningssystemer. Ofte findes de guldførende kvartsårer kun i disse sekundære strukturer, hvor guldet er fanget og opkoncentreret ved hjælp hydrotermale fluider (se boks 2).



Figur 3. Placerforekomster udnyttes i mange lande af lokalbefolkningen som en ekstra indtægtskilde. Ved hjælp af simple redskaber kan store mængder af sediment hver dag sorteres og finkæmmes for guld. I sjældne tilfælde dukker særligt store 'gold nuggets' frem af sandet - til tider på størrelse med hønseæg! Billedet er fra højlandet i Papua Ny Guinea, hvor de centrale flodsystemer er tætbeholdet med 'lokale' guldgravere.

Boks 2



Guldudfældning er et resultat af graden af fysiske og kemiske ændringer i de bjergarter som en gulførende opløsning gennemtrænger. Afgørende parametre er først og fremmest tryk, temperatur, pH og Eh.

A) Fluidier (se VARV 1998,1) genereres eksempelvis fra et underliggende magmakammer og stiger op gennem Jordens skorpe via shear- eller forkastningsrelaterede sprækker. B) Udfældning i forbindelse med kogning er en klassisk proces til guldudfældning. Jo højere niveau i skorpen opløsningen når, jo lavere bliver det resulterende tryk. Herved begynder opløsningen at koge, da temperaturen typisk er ganske høj, og guld udkrystalliserer, da kogningen gør kompleks-ionerne ustabile. C) Kemisk udfældning forekommer typisk, når gulførende opløsninger passerer fra én type bjergart til en anden. Den ændrede bjergarts kemi og eventuel blanding med andre hydrotermale opløsninger forårsager en ændring i fluidens kemi, der medfører at de guldtransporterende kompleks-ioner bliver ustabile og guldet udfældes.

Boks 2

Hydrotermale fluider (varme, vandige og, ofte saltholdige opløsninger)

Hydrotermale fluider kan betragtes som saltholdige metalførende opløsninger, der dannes som følge af energi- og varmedannende geologiske processer i Jordens skorpe. Ofte er underliggende magmakamre ansvarlige for sådanne opløsninger, men også nedsivende, opvarmet og recirkuleret overfladevand er en væsentlig kilde til hydrotermale fluider, ligesom der ved metamorfose samt shear- og forkastningsbevægelser kan produceres og transporteres store mængder af opvarmede fluider. Under opvarmning og oxidering af fluiderne dannes komplekse ioner ud fra de grundstoffer, der allerede er til stede i fluiderne, ligesom der tilføres grundstoffer fra de omkringliggende bjergarter. Sjældne grundstoffer som guld bindes i disse ionkomplekser, fordi tilstedeværelsen i hydrotermale opløsninger kemisk set er mere favorabel end i den faste bjergart.

Der eksisterer en lang række hydrotermale kompleks-ioner, af hvilke de hyppigste guldførende typer er (HS)-komplekser og halogen-komplekser, henholdsvis af typen $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ og AuCl_2^- . (HS)-komplekser dominerer typisk ved temperaturer under 400°C , hvorimod halogen-komplekser dominerer ved temperaturer over 400°C . Grunden til, at netop disse komplekser optræder, er den hyppige tilstedeværelse af svovl og klor i Jordens skorpe fremfor andre mere sjældne kompleksdannende grundstoffer. Guld er ofte karakteriseret ved et monovalent oxidationstrin (iltningstrin) i hydrotermale opløsninger (Au^+), men ses også med højere oxidationstrin.

Guldførende hydrotermale opløsninger indeholder på trods af deres tilbøjelighed til at transportere sjældne metalliske grundstoffer relativt lave koncentrationer af disse set i et økonomisk perspektiv (for guld ofte kun 1-10 ppb). Dette bevirker, at der kræves store mængder af gennemstrømmende fluider (typisk flere km^3), før en egentlig guldmineralisering kan dannes i et område. Økonomiske forekomster dannes ofte, hvor guldet i allerede guldberigede områder bliver sekundært opkoncentreret af nye hydrotermale opløsninger, eksempelvis omkring store forkastnings- og shearssystemer. Sådanne strukturer virker som transportveje for de hydrotermale opløsninger og fungerer i sidste instans som fælder, hvori guldet udfældes.

Intrusionsrelaterede forekomster (Skærgårdsintrusionen)

Skærgårdsintrusionen (se VARV, 1990,1) er en verdenskendt lagdelt gabbro-intrusion, der ligger i Kangerdlugssuag Fjord ('Den store fjord') i det centrale Østgrønland. Intrusionen er ca. 55 millioner år gammel og er et resultat af tektonisk aktivitet i forbindelse med Atlanterhavets åbning i tidlig Tertiær. De første rapporter om en egentlig guldmineralisering blev offentliggjort i 1987, da det canadisk-grønlandske råstoffirma Platinova A/S i samarbejde med Grønlands Geologiske Undersøgelse overraskende registrerede høje guldværdier i en 2-3 meter tyk horisont. Det guldførende lag er del af en 3.000 meter tyk lagdelt bjergartssekvens, der skråner ned igennem intrusionen. Selvom guldet i Skærgården på nuværende tidspunkt ikke brydes, er mineraliseringen et interessant studie i, hvorledes processer i magmakamre er i stand til at opkoncentrere guld.



Den centrale del af Skærgårdsintrusionen set mod øst. Det lagdelte fjeld i forgrunden er ca. 600 meter højt, og det guldførende lag er placeret lige under de tre markante lyse lag i toppen af sekvensen. Fin-skala lagdeling ses længere nede. Desuden ses en stor blok, der stammer fra intrusionens øvre del, og som er faldet ned under størkningsprocessen.

Guld i Skærgårdsintrusionen forekommer sammen med platinmetaller, hovedsageligt som legeringer associeret med kobbersulfider. Disse findes oftest i mellemrummene mellem og i randen af tidlig krystalliseret feldspat (plagioklas) og pyroksen. Det observerede guld er opkoncentreret og transporteret i en restsmelte mellem allerede krystalliserede silikat-korn under de sidste stadier af krystallisationsforløbet. Samtidigt menes nedfaldne blokke fra den øvre del af intrusionen at have indvirket på mineraliseringens dannelse.

Guldmineraliseringen i Skærgårdsintrusionen er særligt interessant, fordi den viser, at guld i basaltiske magmaer kan findes i tilstrækkeligt store koncentrationer til, at det kan udfældes mere eller mindre direkte fra magmaet. Forekomster af denne type har indtil nu været ukendte, bl.a. fordi guldet ofte kun er udbredt i tynde lag og derved svært at lokalisere. Da gabbrointrusioner med samme oprindelse som Skærgårdsintrusionen imidlertid er ganske hyppige, er det ikke utænkeligt, at man vil opdage lignende intrusionsrelaterede guldmineraliseringer i fremtiden.

Ordforklaring

Grønstensbælte: Oftest prækambriske terræner bestående af metamorfoserede overfladebjergarter som lavaer og sedimenter.

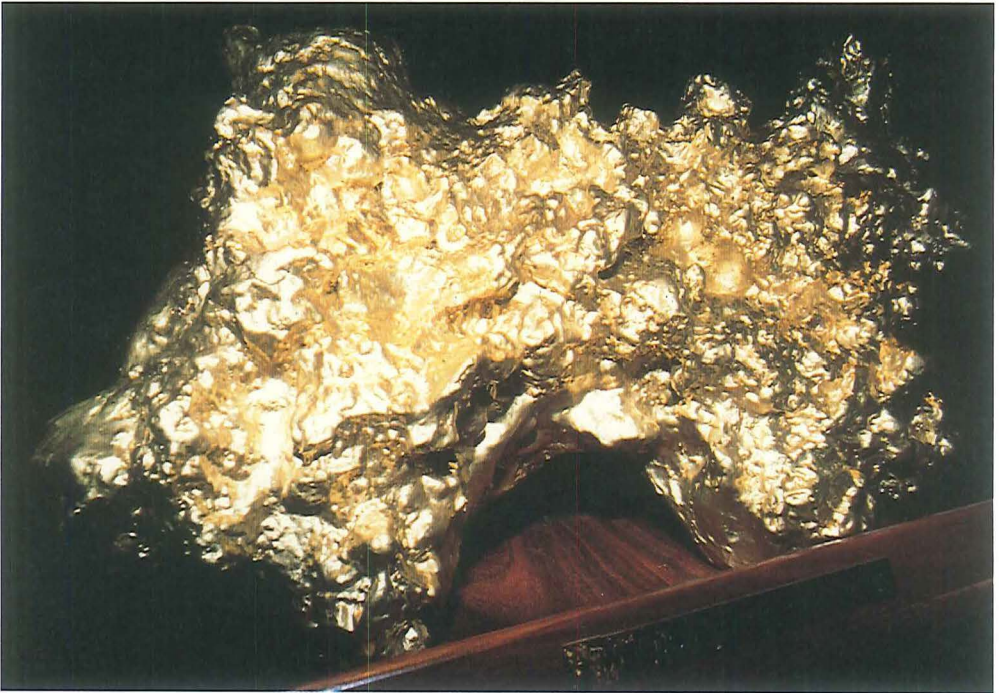
Hydrotermal: Kommer af de græske ord hyder = vand og thermos = varmt. Hydrotermale fluider er en geologisk betegnelse for varme vandige opløsninger. I mange områder med aktiv vulkanisme siver hydrotermalt vand ud på overfladen og danner varme kilder. Den forøgede opløselighed af mange metaller i varme fluider bevirker, at hydrotermal aktivitet kan kædes til dannelsen af mange typer af malmforekomster.

Halogener: En samlebetegnelse for grundstoffer i hovedgruppe VII i det periodiske system, hvoraf de mest almindelige er fluor (F), klor (Cl), brom (Br) og iod (I). Fælles for halogenerne er, at de nemt optager en enkelt overskydende elektron og dermed danner monovalente negativt ladede ioner (f.eks. F⁻ og Cl⁻). Disse tiltrækker gerne positivt ladede ioner som f.eks. Na⁺ og K⁺ og danner salte som bl.a. stensalt (NaCl) og bittersalt (sylvin, KCl). Opkoncentrering af specielt Cl⁻-ioner i hydro-

termale fluider er med til at øge opløseligheden af flere vigtige metaller, ikke kun af guld som nævnt i teksten, men også i høj grad bly og zink. Klorholdigt hydrotermalt vand er derfor også en vigtig bestanddel ved dannelsen af bly- og zinkforekomster.

ppb: parts per billion eller på dansk: en milliardedel. Koncentrationen af guld er i de fleste geologiske miljøer så lille, at den regnes i ppb. Har en bjergart 1 ppb guld betyder det, at der er 1 mikrogram (10^{-6} gram) guld per kilo sten.

Sericit: Finkornet lys glimmer, der oftest dannes ved nedbrydning af feldspat i forbindelse med metamorfose og hydrotermal omdannelse.



Kopi af verdens største guld klump (nugget), 'Welcome Stranger', der vejer ca. 71 kg og blev fundet i Australien i 1869. Foto Jakob Laurrup.