

# Hvordan ble Kongsberg-sølvet dannet?

Tom V. Segalstad

I henhold til legenden skal Kongsberg sølvforekomster, som ligger ca. 80 km vest for Oslo, ha blitt funnet av en ung pike og en ung gutt som gjette kyr i fjellet. Sølvet skal ha blitt funnet da stor-oksen skrapte vekk mosen fra berget. Nå mente Kongen at alle edle metaller som gull og sølv tilhørte "de edle", nemlig Kongen selv. Kong Christian IV av Danmark og Norge beordret byggingen av Kongsberg Sølvverk i 1623. Det følgende år besøkte Kongen funnstedet for sølvet, som fikk navnet "Kongens grube", and Kongen grunnla byen Kongsberg (som jo betyr Kongens berg) under sitt besøk. "Kongens grube" viste seg å være den rikeste av de mange hundre gruber og skjerp i det ca. 5 x 20 km store sentrale sølvgrube-området. Denne gruben nådde til slutt et dyp på 1067 m. Vogt (1913) skriver at hele området med sølvforekomster er opptil 30 km langt og 5 - 15 km bredt, om vi også medregner perifere sølvforekomster (slike som f.eks. Humlebekk grube ved Hokksund).

Kongsberg Sølvverk var i drift fra 1623 til 1958. Den totale sølvproduksjonen har blitt estimert til ca. 2000 tonn, hvis man også tar hensyn til metallurgiske svinn ved utvinningen og tyverier (Neumann 1944). Mye av sølvet ble fraktet til København, og bidro til å finansiere Kongens mer eller mindre vellykkede kriger. Det norske samfunn fikk nytte av Sølvverket gjennom opprettelsen av et pengesystem, et trykkesystem, en yrkesskole, og i 1757 den første akademiske utdanning: Bergseminaret på Kongsberg.

Bergseminaret på Kongsberg utgjorde grunnlaget for det nåværende Universitetet i Oslo, som ble grunnlagt i 1811. De omfattende mineralsamlingene ble flyttet fra Bergseminaret på Kongsberg til Oslo, og er nå en del av samlingene ved Naturhistorisk Museum (tidligere Mineralogisk-Geologisk Museum) ved Universitetet i Oslo. Sølvprøver utstilt i Museet har blitt avbildet i den internasjonale vitenskapelige litteratur. Da innbruddstyver stjal sølvprøver fra Museet i 1975, ble de sannsynligvis umulige å selge, og kom til slutt tilbake til Museets utstillingsmontre i 1991 (Segalstad 2001b).

## Enestående sølv

Gedigent (rent) sølv fra Kongsberg er enestående på grunn av sin nydelige opptreden som trådsølv, ofte dannet i åpne hulrom (Fig. 1). Trådsølv består av lange rekker av små sølvkrystaller som vokste fra sølvsulfid-mineralet argentitt (sølvglans), Fig. 2, og også direkte fra væske (Vogt 1899). Denne opptreden av sølvet kan ses på som en form for dendrittisk krystallvekst. Massivt gedigent sølv er muligens den hyppigst opptredende form sølvet opptrer i på Kongsberg, hvor sølvet kan opptre fra tynne sprekkefyllinger til gigantiske



*Fig. 1. Enestående tråder av gedigent sølv fra Kongsberg avbildet på norsk frimerke utgitt av Posten Norge 28. juni 1998. Foto: Per E. Aas; samling: Naturhistorisk Museum, Universitetet i Oslo. Grafisk design: Kai Gjelseth.*





**Fig. 2.** Sølvtråder vokser ut fra sølvulfid-mineralet argentitt. Tegning fra Vogt (1899). Prøven er utstilt i Naturhistorisk Museum, Universitetet i Oslo.

klumper. Den største sølvklumpen ble funnet i Kongens grube i 1867, og veide ca. 500 kg. Gode sølvkrystaller, til og med fortvillinget, er sjeldne i naturen, men har blitt funnet i opptil over 3 cm lengde på Kongsberg.

Kongsberg-sølv er vanligvis ganske rent, med 1 – 2 % kvikksølv og i gjennomsnitt bare ca. 0,005 % gull. Lokalt, som en sjeldenhet, har det blitt funnet en 50:50 sølv/gull-legering (elektrum), og lokalt har det vært rapportert et kvikksølvinnhold opp til 23 % i sølv (Neumann 1944).

### Geologi

Sølvgrubene ved Kongsberg befinner seg vest for og nær den vestre grense til den permiske kontinentale Oslo-riften (Ihlen 1986). Distriktets eldste bergarter er prekambriske gneiser og glimmerskifre dannet ved kraftig mekanisk deformasjon og sterk grad av omvandling (metamorfose) for ca. 1600 Ma (millioner år) siden. Yngre granittiske gneiser ble dannet for 1560 - 1400 Ma siden, og dioritt og gabbro for ca. 1500 Ma siden. En yngre gabbro kalt "Vinor-diabas" er 1400 - 1200 Ma gammel, mens de yngste granittiske gneisene (f.eks. Meheia-granitten) er dannet ved oppsmelting av de lokale bergartene, i forbindelse med en yngre kraftig mekanisk deformasjon og metamorfose i Kongsberg-distriktet datert til 1200 - 1000 Ma (Jacobsen & Heier 1978). Kongsberg-distriktets metamorfe bergarter har derfor fått et utpreget båndet utseende, med kraftige overfoldninger (isoklinale folder), Fig. 3.

Et karakteristisk trekk i Kongsberg-distriktet (og for den saks skyld også i Bamble- og Modum-distriktene) er de såkalte *fahlbånd* (Bugge 1917). Dette er sulfid-førende "skifrige" soner i gneis og amfibolitt, som kan inneholde opptil 8 volum-% med sulfider, mest jernsulfidene magnetkis (pyrrhotitt) og svovelkis (pyritt). På grunn av det relativt høye jernsulfid-innholdet, får fahlbånd oftest et rustent utseende på forvitret overflate. Dette har gitt navnet til fahlbåndene, fordi "fahl" er et gammelt tysk adjektiv, som betyr rustbrun eller rustgul (Münster 1894). Fahlbåndene kan bli opptil 900 m brede og 10 km lange (Bugge 1917). Den metamorfe alderen er ca. 1,1 Ma (Jacobsen & Heier 1978). Mineralkornene i fahlbåndene viser ofte en fragmentarisk kornform (mylonittisk), som tyder på stor grad av deformasjon.

Det er gjennom årene fremmet et stort antall hypoteser for hvordan fahlbåndene er dannet. Analyser av svovel-isotoper (Segalstad 1982) indikerer at svovelet har en primær magmatisk opprinnelse med  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} \approx 0$  ‰. Dette støtter de opprinnelige teoriene til Kjerulf & Dahll (1861), Vogt (1899) og Bugge (1917) om at fahlbåndene er dannet ved mekanisk





**Fig. 3.** Naturens eget kunstverk? Bergartene i Kongsberg-distriktet har blitt sterkt deformert, og har fått et båndet utseende gjennom tett (isoklinal) foldning. Foto: Tom V. Segalstad.

deformasjon og metamorfose av magmatisk utskilte sulfider fra gabbroer, mest sannsynlig utskilt fra "Vinor-diabasene". Dannelsen kan muligens ses på som resultatet ville ha vært etter regional metamorfose av Bamble-feltets noritt-gabbro-assosierte nikkelsulfidforekomster (Bugge 1920; Jerpseth & Ellingvåg Petersen 1978; Brickwood 1986).

### Ganger

Kongsberg-distriktet kuttet av yngre sprekkesoner i bestemte retninger. Sprekkene kan være fylt av diabas-ganger, sulfid-førende kvarts-ganger, barytt-ganger, eller kalkspat-ganger. Alderen av sprekkefyllingene er permisk, ca. 265 millioner år, ut fra K-Ar-dateringer av sidestens-omvandlings-mineraler (Ineson et al. 1975; Ihlen et al. 1984).

Sprekker ble fylt med diabas-magma, og andre sprekker ble fylt med varme vandige "hydrotermale" løsninger. Det første hydrotermale systemet krystalliserte hovedsakelig kvarts pluss sulfid-mineralene galenitt (blyglans), sfaleritt (sinkblende), kalkopyritt (kobberkis), og pyritt (svovelkis). Disse første kvartsgangene ble kalt "ganger av første generation" av Bugge (1917), og er typiske for Fiskum-området.

Frøyland & Segalstad (1992) fant at disse kvartsgangene hadde dannelses-temperaturer på ca. 200 °C (median-verdi; variasjonsbredde 125 - 300 °C) og saltholdighet på 4 vekt-% NaCl-ekvivalenter (median-verdi; variasjonsbredde 0 - 8 vekt-%) for et formodet hydrostatisk trykk (vekt av overliggende væskesøyle) på ca. 300 bar. Segalstad & Ohmoto (1986; 1990) fant at oksygen-isotoper i kvartsen fra gangene viste en svært liten variasjon innenfor hele Fiskum-området, og ga en beregnet  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} \approx -1 \text{ ‰}$  for de varme væskene som utfelte kvartsen. Dette kunne ikke være magmatiske væsker eller rent overflatevann (meteorisk vann, inkludert grunnvann), men heller væsker som hadde utvekslet oksygen med sidestene, noe forfatterne kalte "skorpe-vann".



Ut fra termokjemisk modellering vil kvartsgangene kunne ha transportert sine metall-klorid-komplekser ved ca. 300 °C, og felt sine bly- og sink-sulfidmineraler ved temperaturfall fra ca. 285 til 200 °C gjennom samtidig reaksjon med sidestenen. Gjennom sistnevnte prosess kunne pH stige fra ca. 4 til ca. 5. Effektiviteten av bare temperaturfallet er opptil 95 %, mens kombinasjonen av temperaturfallet og pH-økningen vil ha en effektivitet på opptil 99 %. Kvarts-utfellingen ville ved et slikt temperaturfall ha en effektivitet på opptil 64 %.

Segalstad (1982) og Segalstad et al. (1986) fant at svovelisotopene i blyglans, sinkblende og kobberkis i kvartsgangene ved Kjennerudvann viste  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} = 5.8$  til  $6.9$  ‰. Dette kunne være en blanding av svovel oppløst fra fahlbånd pluss fra de alunskifer-biter ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} \approx 13$  ‰) som har falt ned i disse væskefylte sprekkene.

I Kongsberg-området (Lassedalen og Majorplassen) og langs Oslofeltets sydvest-grense (Gjerpandalen) finnes flere flusspat-forekomster. Norman & Segalstad (1978) fant at disse flusspatene hadde væskeinneslutninger som viste at væskene var kokende (ublandbarhet mellom væske og damp), og fant dannelsesstemperaturer fra 203 - 400 °C og saltholdigheter på 1 - 46 vekt-% NaCl-ekvivalenter. Sjeldne jordartselementer (REE) i flusspatene viste at væskene måtte ha kommet fra permiske granitter, men som for Lassedalens vedkommende etterhvert hadde blandet seg med "skorpevann". Flusspater fra de sølvførende kalkspat-gangene på Kongsberg viste ikke spor av magmatisk vann, men bare REE fra sidestenen, noe som tydet på "skorpevann".

Et annet separat hydrotermalt system krystalliserte hovedsakelig barytt (tungspat). Segalstad (1982) og Segalstad et al. (1986) fant her  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} \approx 12$  ‰ for alle undersøkte barytter fra Kongsberg. Dette er samme verdi som for permisk havvann (Claypool et al. 1980), og kan tyde på at væsker kan ha løst opp høyereliggende permiske evaporitter, og utfelt bariumsulfat i dypet ved oppvarming (barytt har retrograd løselighet, dvs. felles bedre fra oppvarmende væsker; Holland & Malinin 1979). Samtidig kan klor fra halitt (stensalt; NaCl) i evaporittene ha blitt oppløst og bidratt til klor-kompleksdannelse med metaller i væskene.

### Sølvførende ganger

Et senere hydrotermalt gangsystem avsatte kalsitt (kalkspat) som det dominerende gang-mineralet, og førte (i krystallasjons-rekkefølge) bl.a. pyritt (svovelkis), fluoritt (flusspat), galenitt (blyglans), sfaleritt (sinkblende), kalkopyritt (kobberkis), sølv-sulfosalt-mineraler, argentitt (sølvglans), gedigent sølv, og pyrrhotitt (magnetkis), i tillegg til små mengder kobolt- og nikkell-arsenid-mineraler (Neumann 1944), Fig. 4.

Tilknyttet de sølvførende kalkspatgangene, og spesielt til "råtagangene", finner vi en omfattende omvandling av sidestenen til kloritt. Kloritt-omvandlingen kan være opp til 6 meter bred rundt gangene (Bugge 1917), slik at det må ha foregått en omfattende reaksjon mellom væskene og sidestenen.

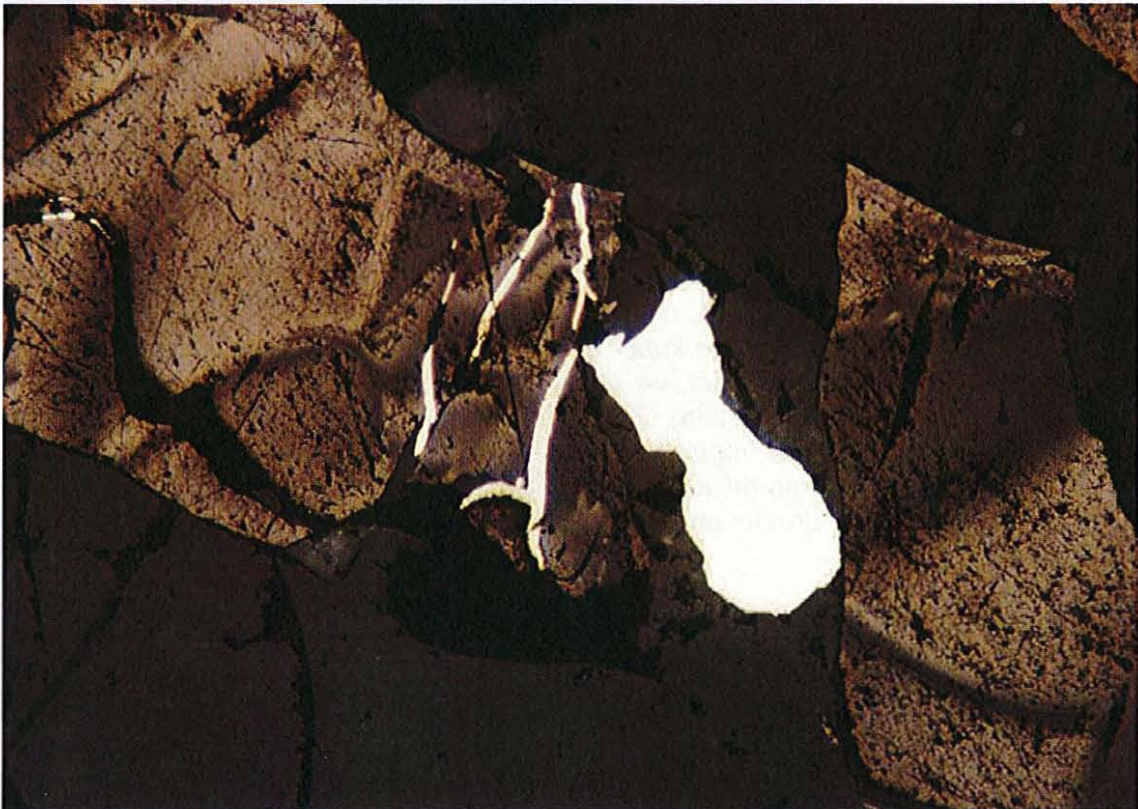
I gangene finnes det et kull-lignende stoff kalt "kullblende", som består av ca. 95 % grafitt (Dons 1956). Grubefolkene fant det såpass ofte sammen med sølv, at de sa: "*Ingen kullblende -- intet sølv*", Fig. 5. I væskeinneslutningene finnes også fargede oljedråper, som er ublandbare med vannet i inneslutningene, Fig. 6. Oljen må ha blitt dannet ved "destillasjon" fra alunskifer i kontakt med de hydrotermale væskene. Karbon-isotoper viser at kullblendene har identiske verdier til alunskifer, som må være opphavet til kullblendene.

Kalkspat-gangsettet er av Segalstad (1996) oppfattet som dannet i skjær-sprekker som åpnet seg, da det ble bevegelse langs de mylonitt-sonene som kalles "*råtaganger*" på Kongsberg. Bevegelsen var en slags "trappe-bevegelse" sydover, som kan ha vært en respons på at Kongsberg-blokken falt inn mot Oslo-graben i permisk tid, Fig. 7.



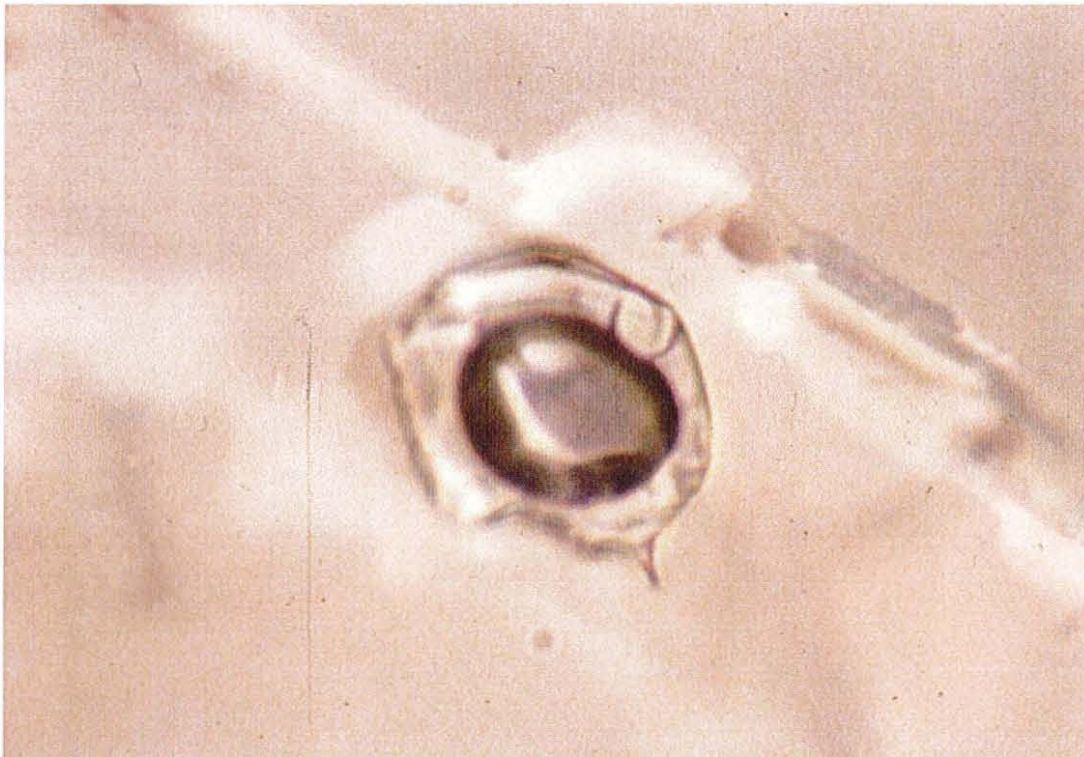


**Fig. 4.** En hvit åre av kalsitt (kalkspat) med sølv og sort argentitt og sort kullblende kutter et rustent "fahlbånd" i Kongens grube, Kongsberg. Foto: Tom V. Segalstad.



**Fig. 5.** Mikroskop-fotografi i reflektert lys av sølv (høy refleksivitet, lys farge) i intim sammenvoksning med kullblende (lav refleksivitet, brun til grålig farge) fra Kongens grube, Kongsberg (Naturhistorisk Museums samling). De mørke grå og sorte fargene er silikat-mineraler. Lengde av bildet 0,34 mm. Foto: Tom V. Segalstad.



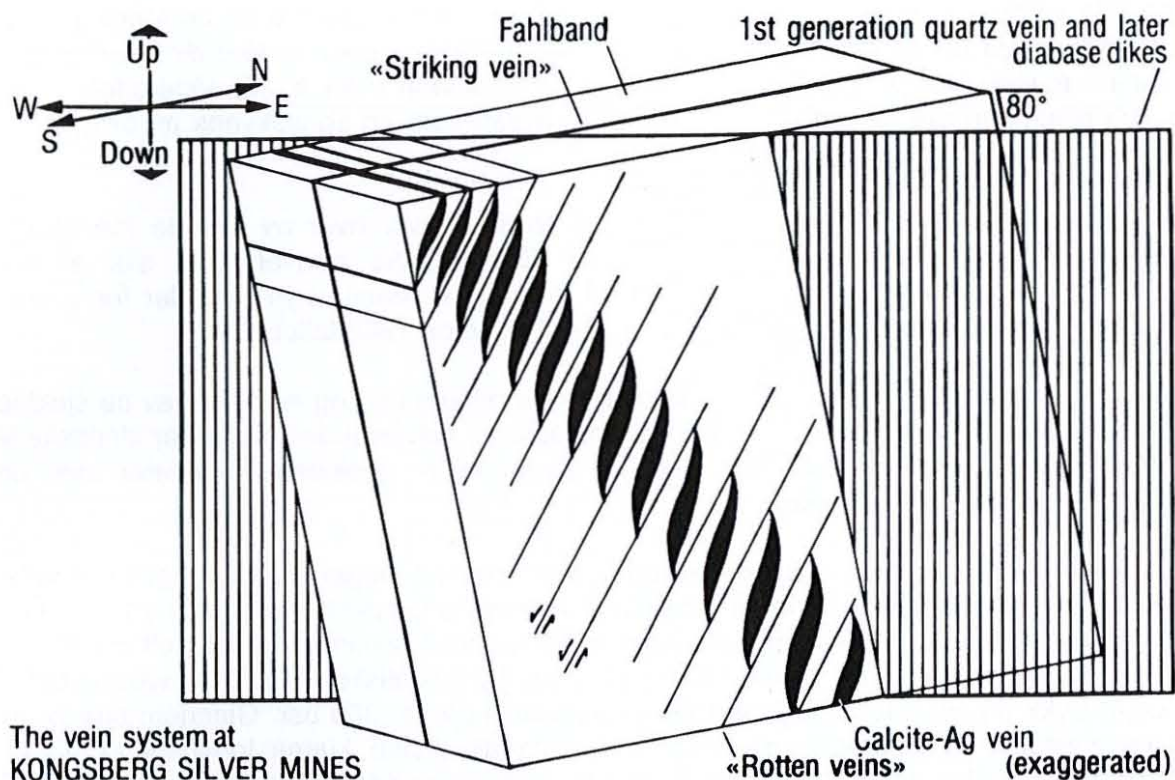


**Fig. 6.** Væskeinnestlutning i kalsitt (kalkspat) fra Kongens grube (Naturhistorisk Museums samling) fotografert ved værelsestemperatur. Væskeinnestlutninger er små hulrom i mineraler, hvor gasser og væsker har blitt fanget inn under mineralveksten, og kan fortelle om hva slags væsker og gasser som mineralet ble dannet fra. Den store grå boblen er en vanddamp-boble i væsken. Mellom vanddamp-boblen og kanten av væskeinnestlutningen ligger en liten, rund, grønn væskedråpe, som ikke er blandbar med den vandige væsken. Den grønne væskedråpen er pleokroisk, dvs. den forandrer farge fra grønn til gul når den dreies i plan-polarisert lys, noe som er typisk for organiske molekyler med forskjellige ligander (Mason 1966). Dette må være en oljedråpe, som sannsynligvis er destillert fra alunskifer, som er en oljeskifer. Lengde av bildet 0,5 mm. Foto: Tom V. Segalstad.

De sølvførende kalkspatgangene (kalt "ganger av 2den generation" av Bugge 1917) er ganske tynne, fra papir-tynne til 10 cm, og sjelden mer enn 33 cm tykke (Vogt 1899; Vogt 1913), og finnes *der sprekkesystemene kutter gjennom fahlbånd*. Dessuten kunne det være ekstra rike sølvførende kalkspat-ganger, de såkalte "*hovedganger*", der de kuttet gjennom eldre sulfidførende kvartsganger. I tillegg til fahlbåndkryss-regelen "*uten gang og fahl intet sølv*", sa de gamle grubefolk også "*ingen kullblende, intet sølv*". Mange lette etter sølv ut fra disse to reglene. Og de som gjorde et sølvfunn, ble synlig belønnet med en ravnefjær i hatten. Derav det fremdeles brukte uttrykket "en fjær i hatten", for de som har gjort en bragd.

Mineraliserings-rekkefølgen (paragenetisk sekvens) i de sølvførende ganger er hovedsakelig: Kvarts, svovelkis, kalkspat (i 5 generasjoner; Münster 1883), kullblende, flusspat, blyglans, sinkblende, kobberkis, sulfosalter av sølv, sølvglans, gedigent sølv, og til slutt magnetkis (Neumann 1944; Johnsen 1987).





**Fig. 7.** En tredimensjonal tegning av gangsystemet på Kongsberg, slik forfatteren tolker det. De førstegenerasjons kvartsganger og senere diabasganger er vertikale, og har et øst-vest strøk. Disse skjærer gjennom Kongsbergfeltets bånd-gneiser og også fahlbånd, som stryker omtrent nord-syd med et fall på 80° mot øst. Et fahlbånd er inntegnet som en blokk, som skyter ut fra papirplanet. Langs fahlbåndet er også inntegnet en første generasjons kvartsgang som følger fahlbåndets strøk, en såkalt "strøkgang" ("striking vein"). Senere mylonitt-soner skjærer igjennom bergartene med et ca. 45° fall mot syd. Her har store mengder vann strømmet og klorittisert bergartene, noe som har gitt disse sprekkene navnet "råtaganger" ("rotten vein"). Forfatteren oppfatter disse gangene som skyvesoner, som følge av at blokken falt ned i Oslo-graben, som sank ned i sydlig retning. Forskyvningen langs råtagangene åpnet skjærsprekker ("tension gashes"; "Fiederspalten"), hvor væsker ble fanget inne, og utkrystalliserte de sølvførende kalkspatgangene på Kongsberg. På tegningen er disse sølvførende kalkspatgangene (sorte, omvendt S-formede) betydelig overdrevet i størrelse, for å få dem synliggjort ("calcite-Ag vein"). Ekstra rike sølvfunn har blitt gjort der kalkspatganger krysser sulfider i førstegenerasjons kvartsganger, og dannet såkalte "hovedganger" med sølv.

### Sølv-dannelsen

Mange teorier har blitt lansert gjennom årene for hvordan Kongsberg-sølv skal ha blitt dannet. Det fører for langt her å gå igjennom alle de forskjellige teorier som har vært lansert opp gjennom årene for Kongsberg-sølvets dannelse. Tronstad (1932) oppsummerte denne saken slik: "Det viser seg dog, at ingen av de bestående teorier fullt og helt kan forklare tilstedeværelsen av samtlige sølvmineraler, og allerede dette viser at det må være meget vanskelig – om ikke umulig – å opstille en **enkel** teori for genesis".

Forskere tilknyttet Mineralogisk-Geologisk Museum (senere en del av Naturhistorisk Museum) ved Universitetet i Oslo har utført forskjellige typer forskning på dannelsen av Kongsberg-sølv gjennom mer enn de siste 70 år.

Henrich Neumann hevdet i 1944, at selv om det ikke fantes beviser for at sølvførende



oppløsninger hadde blitt dannet fra de avkjølede magmatiske vandige løsninger fra den permiske Drammen-granitten ca. 30 km borte, pekte alle indisier på dette, "og å tvile på dette ville være å introdusere unødvendige komplikasjoner" ("*There is no convincing proof of the parentage of the Drammen granite, but all indications point in that direction and to doubt it is to introduce unnecessary complications*"; Neumann 1944, s. 32). Videre tok Henrich Neumann det for gitt at mineralene var avsatt som en konsekvens av avkjølede løsninger (Neumann 1944, s. 29).

Utfordringen for forskning i malmgeologi er å finne ut hvor hver av alle de forskjellige bestanddeler av en malmforekomst kom fra. Det er ikke nødvendigvis slik at alle bestanddelene kom fra en og samme kilde. I dag har vi mange nye metoder for å løse problemer om malmdannelse, som Neumann ikke hadde på 1940-tallet.

Norman & Segalstad (1978) viste at isotopene av strontium (Sr) og innholdet av de sjeldne jordarts-grunnstoffene (REE) i flusspatater fra Kongsbergs sølvførende ganger var identiske til de tilsvarende stoffer i sidestenene. Det var derfor ingen geokjemiske likheter med de permiske granittenes Sr eller REE.

Ved å estimere tykkelsen av de bergarter som må ha ligget over Kongsberg sølvforekomster, har det blitt beregnet at mineralene i gangene krystalliserte på dyp mellom 3 og 4 km (Vogt 1913). Hvis man antar at de sølvmineraliserende løsninger nådde helt opp til den daværende overflaten (som varme kilder), ville det hydrostatiske trykket fra væskesøylen utøve et trykk på ca. 300 - 400 bar, med et middeltall på ca. 350 bar. Gjennom studier av væskeinneslutninger innfanget i mineraler under krystallveksten, kunne Johansen (1985) og Johansen & Segalstad (1985) vise at væsketemperaturen hadde variert mellom 200 og 300 °C, og at saltholdigheten i løsningene hadde variert mellom 0 and 35 vekt-% NaCl-ekvivalenter. Dataene fra de sølvførende gangene viste også at det måtte ha vært minst 3 oppvarmings- og avkjølings-episoder.

De tilknyttede tynne diabas-gangene kunne ikke ha hatt nok varme til å kunne varme opp hele det store hydrotermale systemet på Kongsberg. Norman & Segalstad (1978) viste imidlertid at samtidige flusspat-forekomster måtte ha blitt dannet fra meget varme og salte løsninger geokjemisk tett assosiert med lokale permiske biotitt-granitt-kropper (tilsvarende Drammen-granitten og Nordagutu-granitten) meget nær Kongsbergs sølvforekomster. Slike granitt-magmaer kunne være mulige varmekilder under de sirkulerende hydrotermale løsninger i Kongsbergfeltet, selv om magmatiske løsninger ikke kunne spores i de andre mineraliseringene i Kongsberg-området.

Johansen (1985), Johansen & Segalstad (1985) og Segalstad (1985) viste at det gedigne sølvet har blitt avsatt under perioder med oppvarming fra 250 to 300 °C, samtidig med en avtagende saltholdighet av løsningene fra ca. 25 til mindre enn 20 vekt-% NaCl-ekvivalenter. I kalkspatårer med kullblende i fahlbånd, som ikke nådde tilstrekkelig temperatur eller saltholdighet, har man ikke funnet sølv.

Dette harmonerer med at det ikke bestandig var noen sammenheng mellom rikhet av sølvmalmen i kalkspatgangen og svovel-mengden i det stedlige fahlbånd eller hovedgang (Münster 1894; Neumann 1944). Det var derfor klart at det måtte være noe mer enn bare tilstedeværelse av sulfid i sidesten og kullblende i kalkspatgang som skulle oppfylles for at sølv skulle dannes på Kongsberg.

Resultatene fra væskeinneslutnings-studiene har altså gitt oss flere kriterier for opptreden av sølv på Kongsberg enn regelen om kalkspatgangens fahlbåndkryssing og de gamle grubefolks regel om tilstedeværelse av kullblende. *To nye regler* er at vi også måtte ha en væsketemperatur på 250 °C eller mer, og at væskene måtte ha en saltholdighet på 25 vekt-% NaCl-ekvivalenter eller mer.



Analyser av de stabile isotoper av svovel, karbon, oksygen og hydrogen har blitt rapportert av Segalstad (1982) og Segalstad et al. (1986). Resultatene viste at sulfidmineralene i gangene måtte ha ekstrahert svovel fra fahlbåndene gjennom vann/bergarts-reaksjon. Karbon-isotopene viste at karbonet i kalkspat og kullblende kom fra Oslofeltets svarte alunskifer. Oksygen- og hydrogen-isotopene viste at løsningene var "skorpevann", væsker som hadde gjennomgått en omfattende sirkulasjon gjennom sidestenene, og ekvilibrert seg med dem gjennom vann/bergarts-reaksjoner med omtrent like store mengder av henholdsvis vann og bergart. Svovel-isotopene i barytt-ganger har samme verdier som for sulfat i permisk havvann, noe som kan antyde at metall-kompleksdanneren klor kunne ha kommet fra oppløsning av permiske evaporitter (saltavleiringer).

Oksygen-isotopene viste videre at tidlig dannet kvarts i gangene ble avsatt i et *åpent system*, men at den senere kalkspaten ved hvert sølv-dannende stadium krystalliserte i et *lukket system*. Dette er informasjon av vesentlig betydning for forståelsen av hvordan sølvet på Kongsberg ble avsatt, og introduserer *enda en regel*.

Et åpent system kan utveksle energi (varme og arbeid) og stoffer med omgivelsene. I hydrotermal sammenheng vil nytt varmt vann med uforandret sammensetning stadig kunne strømme gjennom bergartene i et åpent system, der hvor det er tilstrekkelig permeabilitet til at væsker kan strømme. Et isolert system kan ikke utveksle energi og stoffer med omgivelsene, og vil ikke bli utsatt for vanngjennomstrømming. Formelt sett vil et lukket system kunne utveksle energi, men ikke stoffer, med omgivelsene.

I hydrotermal sammenheng vil vi her forstå *et lukket system* som et system hvor vann har kommet inn i systemet, men så har blitt *avsnørt*. Fra dette tidspunkt vil det avsnørte vannet kunne reagere med lokale bergarter, og utveksle energi og stoffer mellom vann og de lokale bergartene i *det avsnørte systemet*, hvor mineraler utkrystalliserer ved fraksjonert krystallisasjon, og hvor vannfasen stadig forandrer sin sammensetning.

### **Termodynamisk/termokjemisk modellering**

Hver kjemiske forbindelse er karakterisert av forskjellige matematiske uttrykk for forbindelsenes indre energi. Disse energi-funksjonene for kjemiske forbindelser har blitt funnet ved eksperimenter, og vil i sin tur være avhengige av temperatur, trykk, og sammensetningen og tilstanden til det aktuelle kjemiske system. Ved å sette inn verdier for de fundamentale energiforholdene for kjemiske forbindelser i datamaskin-programmer, er det mulig å beregne de såkalte termodynamiske (eller mer presist termokjemiske) egenskaper for det aktuelle system. På denne måten kan vi beregne hvilke mineraler som vil være stabile, hvilke mineraler som vil gå i oppløsning, hvor mye (konsentrasjoner) av de forskjellige kjemiske stoffene og forbindelsene (inkludert komplekser) som vil være i oppløsning, surhetsgraden (pH) for løsningen, sammensetningen for de stabile isotoper for alle deler av systemet, etc., alt som en funksjon av saltholdighet, temperatur og trykk.

Slik kvantitativ termodynamisk modellering av det sølvdannende system på Kongsberg har blitt utført av Segalstad (2001a; 2008). Han fant at løsningene måtte ha vært svovel-fattige (total svovel,  $\Sigma S \leq 0,01$  molal; mol pr. kg løsningsmiddel) og rik på karbon ( $\Sigma C \geq 0,1$  molal). Kjemiske reaksjoner mellom en slik salt-rik løsning (jfr. væskeinneslutningsdataene) og magnetkis i fahlbåndene ved temperaturen for minimum løselighet av kalkspat (nær 250 °C) konsumerte protoner etter at systemet var blitt avsnørt ("lukket"). Slik ville pH (surhetsgraden; negativ logaritme til proton-konsentrasjonen) stige i de løsningene som nå befant seg i de avsnørte skjær-sprekkene, hvor særlig kalkspat krystalliserer.

Modelleringen bekrefter at etter felling av blyglans, sinkblende og kobberkis felles først sølvglans, og deretter sølv sammen med kullblende. Når stabiliteten av magnetkis nås i den paragenetiske sekvens, har vi oppnådd likevekt med fahlbåndene, og reaksjonen med magnetkisen i fahlbåndene stopper. På denne måten har hver sølv-mineraliserende syklus i hovedsak blitt gjennomført, og til sist stoppet.



Den termokjemiske modelleringen viser også at sølvet i hovedsak har vært transportert som sølv-klorid-komplekser med konsentrasjon opp til 5 ppm (5 gram sølv pr. tonn løsningsmiddel). Det dominerende sølvkompleks har gjennom hele mineraliserings-syklusen vært  $[\text{AgCl}_2]^-$ .

Kongsberg sølv-distrikts hydrotermale system har sannsynligvis skaffet sitt sølv gjennom oppløsning av sølv fra Oslofeltets svarte alun-skifre, slik løsningene skaffet sitt karboninnhold (jfr. karbonisotoper og oljedråper i væskeinneslutningene). Enten lokalt fra de skifre som lå umiddelbart over, da de falt ned i de sprekkene som åpnet seg (Frøyland & Segalstad 1992), og/eller ved at de hydrotermale løsninger strømmte gjennom det sub-kambriske konglomeratet som ligger umiddelbart under de svarte alunskifrene i Oslofeltet (Segalstad & Ohmoto 1990).

Alunskifer som kilde til bly (som er relativt likt sølv og sink, kjemisk sett) kan testes ved hjelp av bly-isotoper, som har blitt analysert i blyglansprøver fra Kongsbergs sølvforekomster av Moor bath & Vokes (1963) og Bjørlykke et al. (1990). Fra disse data kan man beregne thorium/uran-forholdet (Th/U) til kilden. Hvis ca. 500 millioner år gammelt bly (avsatt på havbunnen i alunskifer) ble oppløst og avsatt igjen fra hydrotermale væsker for ca. 265 millioner år siden, beregner denne forfatteren et Th/U-forhold på ca. 0,1 i kilden til blyet. En gjennomsnittlig jordskorpe har Th/U på ca. 4, og vil derfor være en lite sannsynlig kilde til bly (og sølv og sink) i dette tilfellet. Derimot har alunskifer Th/U på 0.1 (Bjørlykke 1974).

Dette styrker Segalstads hypotese om at ihvertfall bly, sølv, sink og karbon i Kongsbergs sølvforekomst har kommet fra hydrotermal oppløsning av alunskiferen. Svovelisotoper viser at svovel i de sølvførende gangene på Kongsberg har kommet fra oppløsning av fahlbåndenes sulfider, mens termokjemisk modellering av metall-løseligheter sannsynliggjør at kobber kan ha blitt oppløst fra fahlbåndenes sulfider, og etterpå blitt avsatt i de sølvførende gangene.

I et 50 meter tykt prisme av slike svarte skifre, som lå over det 5 x 20 km store sentrale kongsbergske hydrotermale system, ville det være nok å oppløse så lite som en tiendedel av tilgjengelig sølv i alunskiferen (som fører ca. 1 gram sølv pr. tonn skifer), for å kunne avsette de anslagsvis 2000 tonn sølv utvunnet fra Kongsberg-gruvene. Løsningene ville trenge å bare reagere med 3 gram magnetkis pr. tonn fahlbånd for å felle ut de 2000 tonn med sølv, som en gang befant seg i Kongsberg sølvforekomst (Segalstad, 1996).

Betrakter man den termodynamiske stabilitet av argentitt ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) og sølv, finner man at disse mineralene ikke kan felles i de sølvførende ganger på Kongsberg i et åpent system med varmt vann inneholdende oppløst mye karbon, lite svovel, og sølv og andre metaller i form av klorid-komplekser. Hvis derimot systemet lukkes (avsnøres), pH stiger gjennom reaksjon med magnetkis (pyrrhotitt;  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) i sidestenen (fahlbånd), metallsulfid-mineraler felles med tilskuddet av svovel fra oppløst magnetkis, vil nå også argentitt felles. Når svovel-innholdet i væsken senkes, som følge av sulfidmineral-utfellingene i det lukkede system, vil gedigent sølv stabiliseres: Både ved at argentitt blir ustabil og gedigent sølv dannes fra argentitt, og at gedigent sølv felles direkte fra væsken.

Væsken var først mer oksiderende enn magnetkis, og ville reagere spontant med magnetkis. Etter sølvfelling ville væsken i det lukkede system (skjærsprekker, druser og årer) nå likevekt med fahlbåndet og dets magnetkis, og magnetkis krystalliserer som det siste mineral på de sølvførende gangene på Kongsberg før prosessen stopper.

Münster (1894) beskriver eksperimenter, hvor en oppløsning av sølvkarbonat ( $\text{Ag}_2\text{CO}_3$ ) ble sirkulert i en spalte gjennom hornblendeskifer. Etter et par ukers forløp kunne det observeres noen få, tynne sølvskjell. Men gjorde han et lignende eksperiment med stykker av fahlbånd, ble det utfelt større mengder med sølv ganske raskt. Einar Jensen (1939) gjorde også eksperimenter, og fant at de varme væskene måtte være basiske for å felle ut



gedigent sølv. Videre bekreftet han Münsters erfaring med magnetkisens evne til å utfelle sølv fra væskene. Men han betraktet dette mer som en galvanisk prosess enn en kjemisk prosess. Vogt (1899; 1913) var imidlertid motstander av en galvanisk prosess, og så på reaksjonen med fahlbåndets magnetkis og senere felling av metallsulfider og utfelling av gedigent sølv som resultat av kjemiske prosesser. Vi kan i dag se på prosessene som resultat av kjemiske prosesser, som kom i stand på grunn av en initiell termodynamisk ulikevekt, og som gjennom energioverføring søkte å oppnå likevekt.

Termokjemisk modellering av den hydrotermale væskens sølvløselighet for forskjellige sølvkomplekser i likevekt med sølv viser at løsningene, gjennom oppvarming fra 200 til 250 °C under de gitte fysikalsk-kjemiske forhold, ville være i stand til å løse opp 1000 ganger mer sølv, fra ca. 0,005 til 5 ppm i væsken. Ved videre oppvarming fra 250 til 300 °C synker løseligheten, og opptil 90 % av det oppløste sølv vil kunne felles. Ved etterfølgende avkjøling til 200 °C vil ytterligere opptil 9,9 % av oppløst sølv kunne felles.

Hele den aktuelle prosessen er som en "maskin", som konsentrerte tilgjengelig sølv i hele Kongsbergområdet fra de da overliggende alunskifer, og konsentrerte utfelling av sølvet igjen i de kalkspat-utfellende skjærsprekke i fahlbånd. Den potensielle totale sølvutfellings-effektivitet i en slik naturlig "maskin" er beregnet til opptil 99,9 %!

Modelleringen viser at sølvdiklorid-komplekset  $[AgCl_2]$  er det viktigste, etterfulgt av sølvtriklorid-komplekset  $[AgCl_3]^{2-}$ . Sølvbisulfid-komplekset  $[Ag(HS)_2]$  er her ubetydelig, fordi dets løselighet ligger 3 til 5 størrelsesordener lavere enn for sølvdiklorid-komplekset.

Termokjemisk modellering av metallene sølv (Ag), sink (Zn), bly (Pb), jern (Fe), kobber (Cu) og gull (Au) i den hydrotermale væsken under de samme forhold, vil oppløse Zn, Ag, Pb, Fe og Au fra en kildebergart (her alunskifer). Kobber vil ikke løses opp fra denne kildebergarten, men kan komme i løsning fra nedbrytning av kobbersulfider i fahlbåndet. Ved fortsatt oppvarming fra 250 til 300 °C vil alle disse metallene, bortsett fra gull, minske sin løselighet i forhold til sine sulfidminerale med 2 - 3 størrelsesordener, som medfører at utfellings-effektiviteten er 90 - 99 % for hver av disse metallenes felling som sulfidminerale.

Det er interessant å sammenligne disse resultatene med Henrich Neumanns (1944; Fig. 8, s. 36) relative mengdeforhold mellom de sølvførende gangers malmminerale, som stemmer ganske godt overens. Den termokjemiske modellering, basert på energi-relasjonene mellom minerale, væske, og oppløste gasser og stoffer, kan derfor sies å gi en sannsynlig, kvantitativ modell for dannelsen av Kongsberg-sølvet.

Gull viser seg å ikke minske sin løselighet ved oppvarming fra 250 til 300 °C som for de andre modellerte metallene. Dette forklarer muligens hvorfor vi finner lite gull i Kongsberg sølvforekomst. "Gyldisk sølv" er funnet som sjeldenheter, og er formodentlig dannet galvanisk som belegg utenpå utfelt gedigent sølv, der gull ble "fanget" i de avsnørte skjærsprekke.

### Trådsølv

Det som gjør det gedigne Kongsberg-sølvet ganske spesielt i verdens-sammenheng, er det fantastiske trådsølvet. Hva kan være årsaken til at sølvet her ofte danner tråder? Jensen (1939) fant ved sine eksperimenter at trådsølv, som vokser fra argentitt ( $Ag_2S$ ), vokser fra bunnen (slik som våre egne menneskehår). En krystallvekst fra bunnen, på bekostning av argentitt, er å vente, når argentitt har blitt termodynamisk ustabil, og sølv har blitt termodynamisk stabil.

Men når sølv har blitt termodynamisk stabil, og krystalliserer direkte fra de hydrotermale væsker, vil nye krystaller vokse utenpå en tidligere dannet krystall. Væskeinneslutnings-dataene fra de sølvførende ganger på Kongsberg viste at temperaturen steg under sølvdannelsen.



Dette er den mest ugunstige måte å krystallisere noe på, termodynamisk sett. Grunnen er at væsker har en større indre energi enn faste stoffer: For å krystallisere et fast stoff fra en væske, må energidifferansen, kalt latent krystallisasjonsvarme, ledes bort. Og det er ikke så lett i et oppvarmende system!

Den beste måten å gjøre dette på, er å fjerne latent krystallisasjonsvarme fra en påbygning av krystaller i en lang rekke, slik at det blir en tråd. Man finner tilsvarende for iskrystaller, som har vært grundig studert: Ved temperatur like under frysepunktet, når fjerning av latent krystallisasjonsvarme er vanskelig, kan is danne lange nåler (Lock 1990).

Forfatteren har også gjort et tilsvarende eksperiment om vinteren, ved hjelp av et sne-lag på bil-panseret og en motorvarmer (Fig. 8). Sneen bestod av tallrike små is-krystaller. Ved oppvarming begynte isen på panseret å rekrystallisere til lange is-tråder, som kan oppfattes som dendrittisk krystallvekst med preferert vekst langs den sentrale krystall-opbygningen.



**Fig. 8.** Forfatterens bil-panser en vinterdag, fotografert etter at motorvarmeren har fått sne på panseret til å rekrystallisere til lange is-tråder og dendritter. Ikke ulikt prosessen med dannelse av trådsølv ved et oppvarmende hydrotermalt system, hvor den latente krystallisasjonsvarme lettest ledes bort fra lange tråder. Foto: Tom V. Segalstad.

Samme prinsipp benyttes ved konstruksjon av kjølekapper med kjølefinner for elektronikk-utstyr: Konstruksjonen med "dendrittisk" form og spisse finner gjør at varmeutstrålingen blir maksimal. Ikke ulikt de nydelig utviklede sølvtråder på Kongsbergs sølvførende ganger, som også måtte kvitte seg med sin latente krystallisasjonsvarme, når de ble dannet gjennom en oppvarming av det sølv-utfellende hydrotermale system.



## Konklusjon

Det har ut fra dette nok vist seg at Tronstad (1932) fikk rett i at "det må være meget vanskelig – om ikke umulig – å opstille en **enkel** teori for genesis". Grubefolkene hadde sine to regler for å finne sølv: (1) Fahlbåndkryss-regelen "uten gang og fahl intet sølv" om kalkspatganger som krysset fahlbånd, og (2) "ingen kullblende, intet sølv". Imidlertid finnes det i fahlbåndene kryssende kalkspatganger med kullblende, som ikke fører sølv.

Så det må være flere regler som gjelder! Den foreliggende forskning foretatt av denne forfatter med medarbeidere har videre funnet at sølvet ble dannet (3) i et lukket (gjensnørt) system av skjærsprekker, (4) etter tidlig felling av sulfid-mineraler, (5) ved temperatur ved eller over 250 °C, (6) etter en forutgående saltholdighet i de hydrotermale væskene på 25 vekt-% NaCl-ekvivalenter eller mer, og (7) en utfelling hovedsakelig ved stigende temperatur (ihvertfall for trådsølvets vedkommende).

Systemet var bufret med hensyn til redoksforhold, ved tilstedeværelse av kullblende og olje i væskene, noe som medfører at det er omtrent like store konsentrasjoner av karbondioksid (CO<sub>2</sub>) og metan (CH<sub>4</sub>) oppløst i væskene (bekreftet ved gassanalyser av væskeinneslutninger foretatt av I.F. Walder). Væskene var mer oksiderte enn magnetkis, og reagerte derfor med magnetkis i fahlbånd, eller tidligere hydrotermalt utfelte sulfider i kvartsganger (hvor det ble dannet såkalte "hovedganger"), og dannet dihydrogensulfid (H<sub>2</sub>S), som igjen utfelte metallsulfider i et system som hadde blitt avsnørt (lukket). Kalsium oppløst fra sidestenen forbandt seg med væskens oppløste CO<sub>2</sub> til kalkspat, mens karbonet i væskens oppløste metan pluss oljedråper dannet kullblende. Væskens reaksjon med sidestenen (fahlbånd) konsumerte protoner fra væsken, og pH steg. Stabilitet av gedigent sølv ble nådd etter at argentitts stabilitet opphørte, og nå ble gedigent sølv dannet både fra nedbrytning av argentitt og direkte fra væsken. Etter utfelling av sølv, nådde væsken stabilitet med magnetkis, som feltes som siste primær-mineral i de sølvførende kalkspatgangene, og reaksjonen med magnetkis i fahlbåndene stoppet.

Væskeinneslutningsdata viser at denne prosessen kan ha foregått minst 3 ganger, med resultat at hydrotermale væsker har løst opp sølv (og andre metaller) fra alunskifer i et stort område, og samlet og utfelt sølvet i et relativt lite, konsentrert område, hvor sølvet har blitt utvunnet gjennom omfattende grubedrift på Kongsberg.

## Takk

Forfatteren vil benytte anledningen til å takke Norsk Bergverksmuseum ved F. Steinar Nordrum for stor hjelp og imøtekommenhet, for tilgang til grubene og for prøvemateriale, som har gjort dette prosjektet mulig. Videre en stor takk til mine samarbeidskolleger Hiroshi Ohmoto og David I. Norman, og mine daværende hovedfagstudenter Harald Johansen og Merethe Frøyland, samt min daværende Ph.D.-student Ingar F. Walder.

## Litteratur

BJØRLYKKE, A., IHLEN, P.M. & OLERUD, S. (1990): Metallogeny and lead isotope data from the Oslo Paleorift. *Tectonophysics* **178**, 109-126.

BJØRLYKKE, K. (1974): Depositional history and geochemical composition of lower Palaeozoic epicontinental sediments from the Oslo region. *Norges Geologiske Undersøkelse* **305**, 81 s.

BUGGE, A. (1920): Nikkelgruber i Bamble. *Norges Geologiske Undersøkelse* **87**, 2, 14 s.

BUGGE, C. (1917): Kongsbergfeltets geologi. *Norges Geologiske Undersøkelse* **82**, 272 s. + 12 pl. + 7 kart.

BRICKWOOD, J. (1986): The geology and mineralogy of some Fe-Cu-Ni sulphide deposits in the Bamble area, Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* **66**, 3, 189-208.



- CLAYPOOL, G.E., HOLSER, W.T., KAPLAN, I.R., SAKAI, H. & Zak, I. (1980): The age curve of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. *Chemical Geology* **28**, 199-260.
- DONS, J.A. (1956): Coal blend and uraniferous hydrocarbon in Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* **36**, 249-266.
- FRØYLAND, M. & SEGALSTAD, T.V. (1992): Geochemistry of lead-zinc sulfide ore deposits in the Fiskum Area, Southern Norway. *20th Geological Winter Meeting, Reykjavik, Iceland, Abstracts*, 44.
- HOLLAND, H.D. & MALININ, S.D. (1979): The solubility and occurrence of non-ore minerals. I: Barnes, H.L. (Red.): *Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd Edition*. Wiley, New York, 461-508.
- IHLEN, P.M. (1986): The metallogeny of the Kongsberg District. I: Olerud, S. & Ihlen, P.M. (Red.): Metallogeny associated with the Oslo Paleorift. *Sveriges Geologiska Undersökning Ca* **59**, 30-32.
- IHLEN, P.M., INESON, P.R., MITCHELL, J.G. & VOKES, F.M. (1984): K-Ar dating of dolerite dykes in the Kongsberg-Fiskum District, Norway, and their relationships with the silver and base metal veins. *Norsk Geologisk Tidsskrift* **64**, 87-96.
- INESON, P.R., MITCHELL, J.G. & VOKES, F.M. (1975): K-Ar dating of epigenetic mineral deposits: an investigation of the Permian metallogenic province of the Oslo Region, Southern Norway. *Economic Geology* **70**, 1426-1436.
- JACOBSEN, S. & HEIER, K.S. (1978): Rb-Sr isotope systematics in metamorphic rocks, Kongsberg Sector, South Norway. *Lithos* **11**, 257-276.
- JENSEN, E. (1939): Sølv et på Kongsberg. Om de kjemiske prosesser ved dets utfelling og om trådsølv dannelsen. *Norsk Geologisk Tidsskrift* **19**, 1-106.
- JERPSETH, S. & ELLINGVÅG PETERSEN, I. (1978): Bamble nikkelgruver. I: Segalstad, T.V. (Red.): Kodal apatitt/magnetitt/ilmenitt-forekomst og Bamble nikkelgruver. *Institutt for Geologi, Universitetet i Oslo, Intern Skriftserie* **18**, 21-29.
- JOHANSEN, H. (1985): Geokjemi av hydrotermale prosesser i de sølvførende kalkspatganger på Kongsberg. *Upublisert Cand. Scient. hovedoppgave, Universitetet i Oslo*, 239 s.
- JOHANSEN, H. & SEGALSTAD, T.V. (1985): Gangmineraldannelsen i Kongsberg sølvforekomst. *Malmgeologisk symposium "Nye malmtypen i Norge"*. Bergverkenes Landssammenslutnings Industrigruppe, Bergforskningen, 99.
- JOHNSEN, O. (1987): *Sølv fra Kongsberg. Om bergverkshistorie og mineralriktighet*. Doris Bode Verlag GmbH, Haltern/Westfalen, 48 s.
- KJERULF, T. & DAHLL, T. (1861): Om Kongsbergs Ertsdistrikt. *Nyt Magazin for Naturvidenskaberne* **11**, 173-207.
- LOCK, G.H.S. (1990): *The growth and decay of ice*. Cambridge University Press, Cambridge, 434 s.
- MASON, B. (1966): *Principles of geochemistry, 3rd Edition*. Wiley, New York, 329 s.



MOORBATH, S. & VOKES, F.M. (1963): Lead isotope abundance studies on galena occurrences in Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* **43**, 283-343.

MÜNSTER, T. (1883): Bemærkninger om Kongsbergmineraleerne. *Nyt Magazin for Naturvidenskaberne* **27**, 309-322.

MÜNSTER, T. (1894): Kongsberg ertsdistrikt. *Videnskabselskabets Skrifter. I. Matematisk-Naturvidenskabelig Klasse* **1**, 104 s.

NEUMANN, H. (1944): Silver deposits at Kongsberg (the mineral assemblage of a native silver - cobalt - nickel ore type). *Norges Geologiske Undersøkelse* **162**, 133 s. + 8 pl.

NORMAN, D.I. & SEGALSTAD, T.V. (1978): Genesis of fluorite deposits associated with the Oslo Paleorift, Norway. *Geological Society of America, Abstracts with Programs* **10**, 464.

SEGALSTAD, T.V. (1982): Geokjemi av stabile isotoper i Oslo-riften. *Geolognytt* **17**, 44-45.

SEGALSTAD, T.V. (1985): Sølvdannelsen i Kongsberg sølvforekomst. *Malmgeologisk symposium "Nye malmtyper i Norge"*. Bergverkenes Landssammenslutnings Industrigruppe, Bergforskningen, 100.

SEGALSTAD, T.V. (1996): The ore mineralization at the Kongsberg Silver Mines, Norway. I: Jamtveit, B. (Red.): *Fractures, Fluid Flow and Transport in Fractures, 10th Kongsberg Seminar, 8-10 May 1996, Kongsberg, Norway*. Department of Geology, University of Oslo, Abstracts and Program, 6-7.

SEGALSTAD, T.V. (2001a): Termokjemisk modellering av Kongsberg sølvforekomst. *GEONYTT. Norsk Geologisk Forening, Landsmøte 2001, Program og sammendrag*, 97.

SEGALSTAD, T.V. (2001b): Gedigent sølv fra Kongsberg. I: Roaldset, E. & Sjulsen, S.-E. (Red.): *Høydepunkter. Utvalgte attraksjoner*. Universitetets naturhistoriske museer og botanisk hage, Universitetet i Oslo, ISBN 82-7970-002-1, 34-39.

SEGALSTAD, T.V. (2008): *Thermochemical modelling of the Kongsberg silver ore deposit, Norway*. 33rd International Geological Congress, Oslo. 8 august.  
[https://abstracts.congex.com/scripts/JMEEvent/ProgrammeLogic\\_Abstract\\_P.asp?PL=Y&Form\\_Id=8&Client\\_Id='CXST'&Project\\_Id='08080845'&Person\\_Id=1345931](https://abstracts.congex.com/scripts/JMEEvent/ProgrammeLogic_Abstract_P.asp?PL=Y&Form_Id=8&Client_Id='CXST'&Project_Id='08080845'&Person_Id=1345931)

SEGALSTAD, T.V. & OHMOTO, H. (1986): Magmatic and crustal waters in hydrothermal solutions associated with ore deposition in the Permian Oslo Rift, Norway. *Terra Cognita* **6**, 555.

SEGALSTAD, T.V. & OHMOTO, H. (1990): Geochemistry of hydrothermal ore forming processes in the Oslo Rift, Norway. *8th IAGOD Symposium 1990, Ottawa, Canada, Abstracts with Program, Addendum*, 1.

SEGALSTAD, T.V., JOHANSEN, H. & OHMOTO, H. (1986): Geochemistry of hydrothermal processes at the Kongsberg Silver Deposit, Southern Norway. *Terra Cognita* **6**, 511.

TRONSTAD, L. (1932): Bemærkninger til spørsmålet om Kongsberg-sølvets genesis fra et elektrokjemisk standpunkt. *Tidsskrift for Kjemi og Bergvesen* **12**, 2, 15-18.



VOGT, J.H.L. (1899): Über die Bildung des gedigenden Silbers, besonders des Kongsberger Silbers, durch Secundärprocesse aus Silberglanz und andren Silbererzen, und ein Versuch zur Erklärung der Edelheit der Kongsberger Gänge an den Fahlbandkreuzen. *Zeitschrift für praktische Geologie* **1899**, 133-177.

VOGT, J.H.L. (1913): Das Silbervorkommen von Kongsberg in Norwegen. I: Beyschlag, F., Kruch, P. & Vogt, J.H.L. (Red.): *Die Lagerstätten der Nutzbaren Mineralien und Gesteine nach Form, Inhalt und Entstehung, Band 2*. Verlag von Ferdinand Enke, Stuttgart, 154-160.

**Referanse til denne artikkel:**

**Segalstad, T.V. (2012): Hvordan ble Kongsberg-sølvet dannet? Norsk Bergverksmuseum, skrift 49, 101-116.**