

Geokjemisk analyse av bly-sink forekomstene i Fiskum, Buskerud

Merethe Frøyland

Sammendrag

Den geologiske historien til Fiskum-forekomstene skjedde i Perm-tiden for ca. 270 Ma siden. I forbindelse med den permiske riftingen ble bly-/sink-forekomstene dannet i NS-lige ekstensjonssprekker og senere ØV-lige kompresjonssprekker.

Væskeinneslutningsmikrotermometriske data antyder at temperatur og salinitet øker med tiden i NS-sprekkene, og at temperatur og salinitet avtar med tiden i ØV-sprekkene. Forekomstene som har NS-ganger er observert å ha samme mineralparagenese og samme opptreden som forekomstene i ØV-ganger. ØV-gangenes forekomster ser ut til å være noe større.

Det er fremsatt en teori om at løsninger som var i det sub-kambriske konglomeratet begynte å sirkulere i de nydannede sprekkene. Biter av alunskifer, som lå over Fiskum-området på denne tiden, falt ned i sprekkene da de ble dannet. Løsningene kan ha blitt oppvarmet på ca. 3 km dyp av den daværende geotermiske gradient i Oslofjorden. Det kan ha oppstått konvekssjonstrømning av løsninger gjennom konglomeratet og sprekkene.

Løsningene var i likevekt med sidebergarten (i følge $\delta^{18}\text{O}$ -isotopanalyser). Karbonet i alunskiferen virket som en buffer med hensyn til oksygenfugasiteten for løsningene. Alunskifer, fahlbånd og permiske intrusjoner kan ha vært kilder til karbon (alunskifer), svovel (alunskifer og fahlbånd) og metaller (alle tre).

Metallene ble transportert som klorid-komplekser (resultat fra geokjemiske modelleringer) og felt ut som sulfider.

Utfelling av mineralene skjedde som et resultat av avkjøling (silika, pyritt, sinkblende, blyglans, kalkspat), oppvarming (kobberkis), avtagende ΣS (magnetkis), pH-økning (kalkspat) og til slutt avtagende pH som løste opp kalkspat og avsatte kvarts (resultater fra geokjemisk modelleringer sammenholdt med mikroskopiering). Kvarts ble felt ut i åpent system, mens kalkspat ble felt ut i lukket system i henhold til en Rayleighfraksjoneringsmodell for O-isotoper. Trykket da utfelling av kvarts skjedde var maksimum 300 bar. Parageneserekkefølgen er: Kvarts/pyritt \rightarrow sinkblende \rightarrow magnetkis \rightarrow kobberkis \rightarrow blyglans \rightarrow kalkspat \rightarrow kvarts.

Fiskum-forekomstene og de tidligste ikke sølvførende generasjoner av Kongsberg-forekomster ser ut til å ha fellestrekk, mens de sølvførende parageneser i Kongsberg-forekomstene ser ut til å ha en annen tilblivelseshistorie enn Fiskum-forekomstene.

Innledning

Kongsbergsølvvet er kjent over hele verden for sitt utseende, og blir sett på som det fineste i verden. Sølvvet har også hatt mye å si for Norges økonomi og ikke minst historie. Det var på Kongsberg den første høyere utdanning i bergfag fant sted her i landet. Mange geologer har opp gjennom tidene stilt seg spørsmålene: «Hvorfor er Kongsberg-forekomstene så rike på sølv?» og «Hvor kom sølvvet fra?». Ivar Oftedal (1941) foreslo ut fra sporelement-analyser av ertsmineraler i og rundt Oslofeltet at sølvvet kunne ha blitt transportert i hydrotermale løsninger fra Oslofeltet og avsatt på Kongsberg. Dersom Oftedals teori er riktig, må «sølvløsningene» først ha sirkulert gjennom Fiskum-området og avsatt bly-sink forekomstene der, før de nådde Kongsberg. I så tilfelle vil det være viktig å gjøre en geokjemisk analyse av forekomstene i Fiskum og sammenligne resultatene med geokjemiske analyser av sølvforekomstene på Kongsberg for å sjekke om analysene viser sammenheng.

Med dette som utgangspunkt startet forfatteren sitt hovedfagsarbeid i 1990 med Fiskum som feltområde og hadde til hensikt å karakterisere Fiskum-områdets hydrotermale løsninger. Det ble gjort feltarbeid (sommere 1990 og 1991), malmmikroskopi, væskemikrotermometri, stabile isotopanalyser ($\delta^{18}\text{O}$ og $\delta^{13}\text{C}$) og termokjemiske modelleringer på hydrotermale bly-sink forekomster i Fiskum-området. Hensikten var å finne ut hvilke temperaturer, saliniteter og kilder disse løsningene hadde, hvilke utfellingsmekanismer som fant sted, og om analysene viser geografisk termisk gradient. Det er gjort lignende arbeid på Kongsberg-forekomstene (Johansen 1985, Segalstad et al. 1986). Data fra Fiskum-forekomster ble kort sammenlignet med data fra Kongsberg-forekomstene for å teste om Oftedal's teori kunne være riktig. Det er gitt en oppsummering av hovedfagsarbeidet i denne artikkelen.

Geologisk beskrivelse av feltområdet

Feltområdet, videre kalt Fiskumfeltet, ligger i Fiskum, Øvre Eiker kommune i Sør-Norge. Det er avgrenset av Oslofeltet på østsiden, og Kongsberg by på vestsiden. Feltet strekker seg til Skollenborg i sør, og Junger i nord (Figur 1). Fiskumfeltet er en del av Kongsbergsektoren (Starmer 1991), tidligere kalt Kongsberg-Bamble formasjonen (Bugge 1928). Fiskumfeltet (Figur 1) består av kvarts-

plagioklas-biotitt som dominerende prekambrisk gneis (Jacobsen 1975), amfibolitt, gabbro og diabas, blant andre Vinordiabas. Det finnes også prekambrisk kvartsitt, kalkbenker og fahlbånd (se kvarts/feltspat/glimmer/granat gneis på Figur 1).

I overgangen fra Karbon til Perm, 300 Ma siden (Sundvoll et al. 1990), oppstod en serie med store forkastninger og dannelsen av den såkalte Oslograbenen. I begynnelsen av perioden ble den store friksjonsbreksjen dannet i grunnfjellet vest for Kongsberg (Bugge 1928). For 270-276 Ma siden (Ihlen et al. 1984) ble steiltstående sprekker i Kongsbergsektoren tettet igjen med biter av et karbonrikt materiale, gangminerale (kvarts, flusspat, kalkspat og zeolitter) og gangbergarter (diabas, Bugge 1917, og feltspatrike aplitter, Nilsen pers. medd.). Det er ikke observert barytt i sprekkene i Fiskum-området slik som i Kongsberg-området. Gangene i Fiskum-området med kvarts som dominerende gangmineral og blyglans og sinkblende som dominerende malmminerale, blir videre kalt Fiskum-forekomstene.

BESKRIVELSE AV FISKUM-FOREKOMSTENE

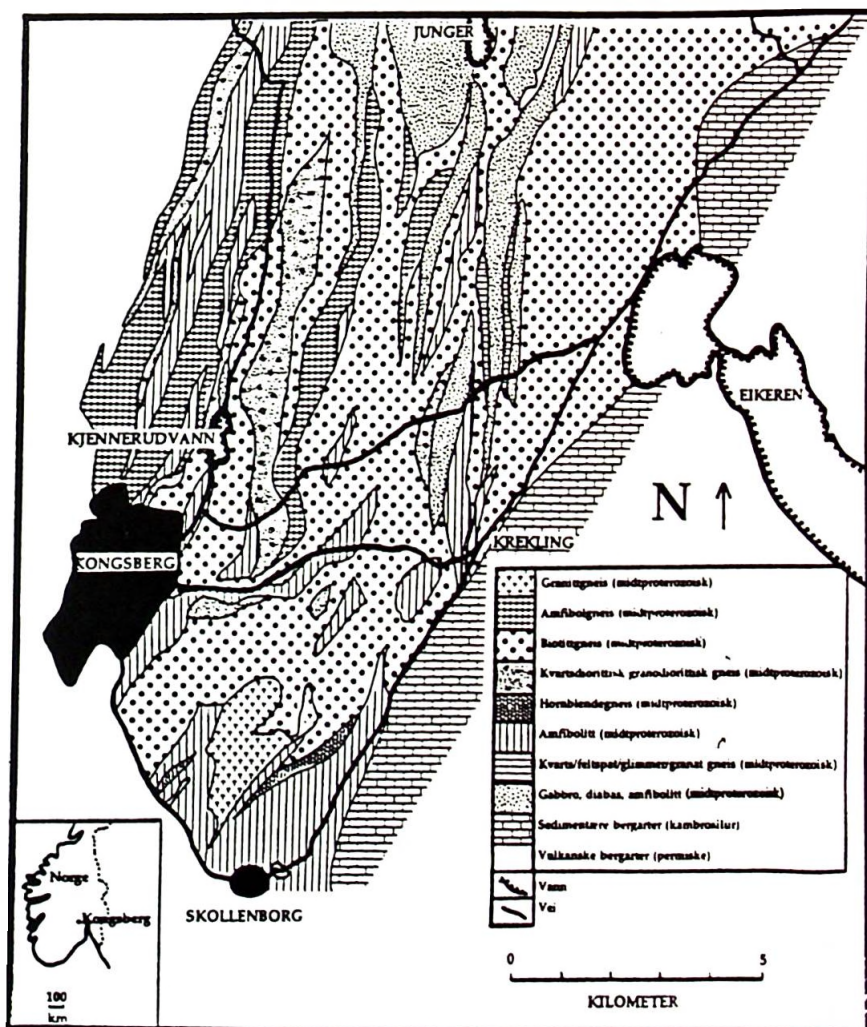
Feltobservasjoner

Det er undersøkt 78 Fiskum-forekomster (1-78 på

Figur 2), tatt prøver av alunskiferen til C-isotop-analyser (79-83 på Figur 2), og gjort strøk- og fall-målinger av 120 kvartsganger. Strøkmålingene viser to hovedretninger, en i ca. NS retning og en i ca. ØV retning. Sprekkes fall er tilnærmet vertikal. I forekomstene 1 og 29 (Figur 2) er det observert at en kvartsgang med NS-lig strøk blir krysset av en kvartsgang med ØV-lig strøk. ØV-sprekkene fører de største forekomstene, sammenlignet med NS-sprekkene.

Sammen med kvarts opptrer et karbonrikt materiale med kullblende (2 mm til 1 cm i diameter) og grafit (observert i mikroskop), videre kalt karbonmateriale. Dette materialet opptrer som lag mellom sidesteinen og kvartsgangen, eller som biter i kvartsgangen. Lagene er ca. 1-3 cm tykke, og bitene varierer mellom 1 cm og opptil 40 cm i diameter. Karbonmaterialagene og bitene er ofte oppsprukket og intrudert av tynne (ca. 0.50 cm tykke) kvartsårer. Kilden til karbonmaterialet er tolket å være alunskiferen (Bugge 1917) eller sidebergarten (Ihlen et al. 1984). Det er observert Slickenside-strukturer i karbonmaterialet i Fiskum-forekomstene. Det betyr at det har vært bevegelse i sprekkene. Slickenside-strukturene er tolket for noen forekomster, og viser at NS-sprekkene er ekstensjonssprekker, mens ØV-sprekkene er kompresjonssprekker.

Noen få steder kan man se rester etter kalkspat i



Figur 1. Geologisk kart over Fiskum-området. Kartet er en forenklet versjon av K.S. Nilsen's kart (in prep. NGU).

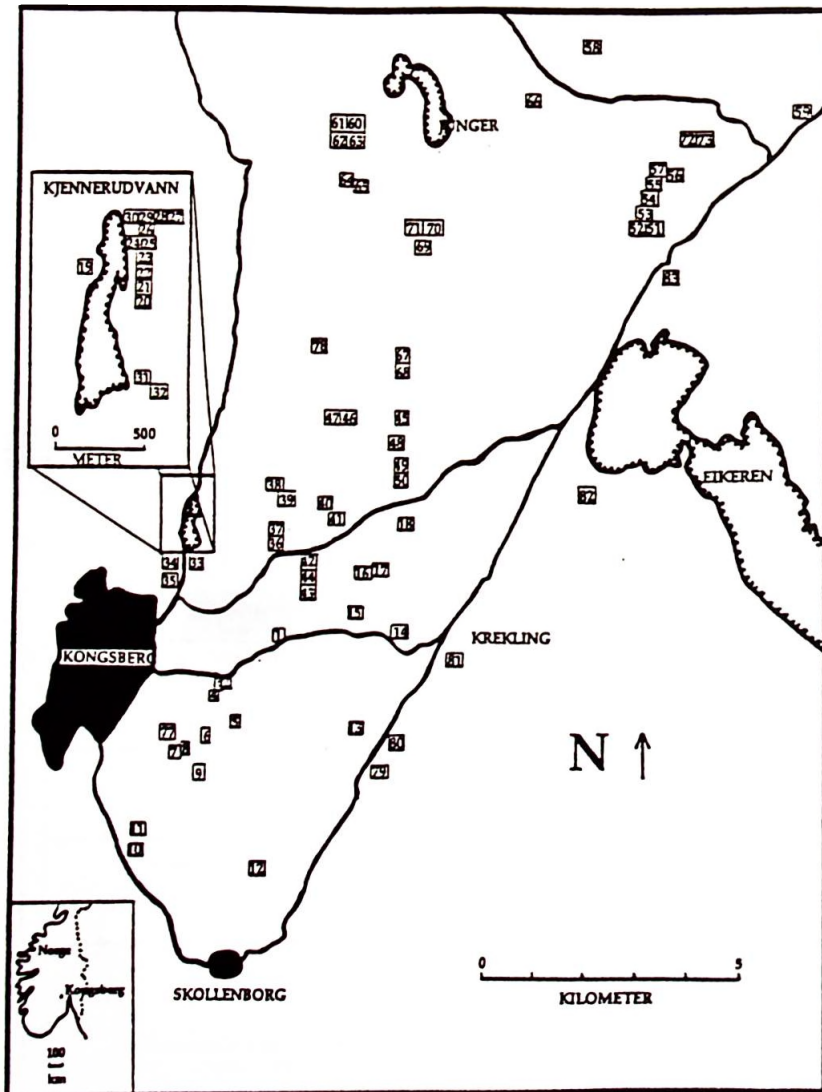
midten av kvartsgangene, men stort sett er kalkspat oppløst og delvis pseudomorft erstattet av en siste puls kvartsløsning. Kalkspat er med andre ord sist utfelt mineral eller utfelt rett før siste kvartsfelling. Flusspatganger opptrer sammen med kvartsganger i noen forekomster. I forekomst 5 (Figur 2) er det observert flusspatkrystaller krystallisert på kvartskrystaller og kvartskrystaller krystallisert på flusspatkrystaller. Flusspat ser derfor ut til å ha krystallisert mellom kvartspulsene. Kvarts- og flusspatgangene varierer fra cm-tykkelse og opp til over en meter. Flusspatgangene og pseudomorfoosereaksjoner i de øvrige kvartsgangene opptrer i den sørlige enden av feltet.

Feltobservasjoner gjort av forfatter og Bugge (1917) tyder på at diabasgangene og kvartsgangene er dannet stort sett samtidig. K-Ar dateringer gjort på omvandlingsmineralene langs kvartsgangene og diabasgangene viser det samme (Ihlen et al. 1984), og gir en alder på minimum 231 Ma og maksimum 272 Ma (Ineson et al. 1975 og Ihlen et al. 1984).

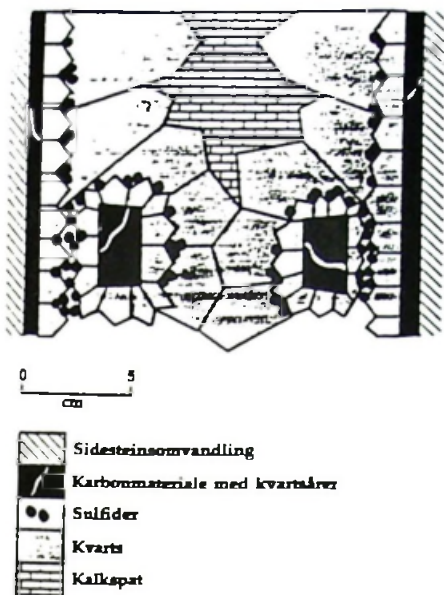
Det opptrer ofte flere parallelle kvartsganger med ulike tykkelser i samme forekomst. Kvartskrystallene har ofte «rot» på sidesteinen/karbonmaterialene på begge sider av sprekken, og vokser inno-

ver mot midten av gangen, slik at gangen får et symmetrisk utseende. Kvartsen opptrer ofte med velutviklede krystaller (som varierer i lengde fra 1 til 5 cm) som gir gangene den karakteristiske kamstrukturen. Enkelte steder opptrer det store biter av karbonmateriale, som kvartsen starter krystalliseringen fra. I slike tilfeller får ikke gangen symmetrisk utseende. Det har vært mulig å observere to typer kvartsgenerasjoner (Figur 3). I noen forekomster opptrer disse to kvartsgenerasjonene i samme gang. I andre forekomster opptrer de separat.

Foruten blyglans (sølvholdig) og sinkblende er også svovelkis, kobberkis og magnetkis svært vanlig i Fiskum-forekomstene. Pyritt opptrer oftest nær sidesteinen sammen med første-generasjon kvarts, men også sammen med andre-generasjon kvarts, når andre-generasjon kvarts opptrer uten første-generasjon kvarts. Magnetkis opptrer stort sett mikroskopisk, bortsett fra i forekomst 3 (Figur 2), hvor det er mulig å finne biter av magnetkis opptil ca. 5 cm i diameter. Sinkblende og pyritt opptrer i størst mengde av sulfidene, og nærmest sidesteinen (det vil si tidligst).



Figur 2. Oversikt over Fiskum-forekomstene med nummer. Beskrivelse av forekomstene i Frøyland (1992).



Figur 3.
Skjematisk skisse av en typisk Fiskum-forekomst.

Malmmikroskopi

Den generelle paragenetiske rekkefølgen er her tolket som:

Pyritt → sinkblende → magnetkis → kobberkis → blyglans.

Rekkefølgen er funnet ved studier av 44 slip. Glenne (1966) kom fram til omtrent den samme parageneserekkefølgen for Fiskum-forekomstene:

pyritt → sinkblende og kobberkis → blyglans.

Det har ikke vært mulig å observere noen regionale tendenser i Fiskum-området malm Petrografi. Feltobservasjoner forteller at det er dannet kvarts under hele parageneserekkefølgen i Fiskum-forekomstene, mens kalkspat er siste dannede mineral (bortsett fra sen kvarts uten sulfider, pseudomorfose).

Væskeinneslutnings-mikrotermometri

Det er gjort mikrotermometri på primære væskeinneslutninger i kvarts fra 14 Fiskum-forekomster. Alle inneslutningene inneholder to faser: vann og gassfase (vann damp). Inneslutningene opptrer med 5-10 volumprosent gass, resten er væske. Med andre ord dominerer væskefasen. Kvarts fra Fiskum-forekomstene er svært rik på væskeinneslutninger. Inneslutningene i kvarts fra hele feltet er av samme type, det kan bety at kvarts i Fiskum-forekomstene er avsatt fra samme løsning eller løsninger med samme kilde. Det er ikke observert tegn til koking i væskeinneslutningene. Væskeinneslutningene homogeniserer til væskefase. Utfellingen av mineralene må derfor ha skjedd over kokekurven i væskefeltet. De fleste væskeinneslutningene fra Fiskum-området har salinitet rundt 4 wt% NaCl-ekvivalenter (Figur 4a). Homogeniseringstemperaturene har størst hyppighet på rundt 180°C (Figur 4b). Det aritmetiske middel for alle tetthetene av inneslutningene er 0.92 g/cm³. Tetthetsberegningene antyder at trykket har vært konstant under krystalliseringen, fordi tetthet-

ene i inneslutningene varierer lite i forhold til hverandre. De fleste varierer innenfor intervallet 0.90-0.94 g/cm³.

For å finne ut hvilke trykk mineralene i Fiskum-forekomstene krystalliserte under, kan man estimere dette ut fra hvor dypt nede i skorpen utfellingen av mineralene skjedde. Fiskum-forekomstene er datert til å være av permisk alder. I det Oslo grabenen ble dannet ved overgangen mellom Karbon og Perm, antas det at det lå kambriske, ordovisiske og siluriske skifre og kalkbenker sammen med silurisk og permisk sandstein over Fiskum-området. Denne sedimentære lagpakken er beregnet av Vogt (1907) og Bjørlykke (1974) å tilsvare ca. 3 km tykk. Feltobservasjoner tilsier at sprekke var dannet før løsningene kom, siden biter av alunskifer ser ut til å ha falt ned i sprekke. Alunskiferen er av kambrisk alder, sprekke må derfor ha gått opp i de tidlige kambriske avsetningene, men ikke nødvendigvis helt opp til overflaten. Det er likevel ikke usannsynlig at sprekke gikk helt opp til overflaten, fordi det allerede er påvist forkastninger på flere km i forbindelse med Osloriftdannelsen (Dons og Larsen 1978). I dette tilfellet vil det være snakk om et hydrostatisk trykk på ca. 300 bar, som gir dannelses temperatur med størst hyppighet på maks. 200°C (forutsatt at det er vann helt opp til overflaten i de åpne sprekke). Det viser seg at temperaturene og salinitetene er svært like over hele Fiskum-området. Det har ikke vært mulig å observere noen geografisk termal gradient over Fiskum-området.

Forekomstene 49 og 73 (Figur 2) er tatt ut for å sjekke om det er forskjeller mellom NS- og ØV-gangene. Det er gjort forsøk på å mikrotermometri-analyser av inneslutninger i kvarts fra hele tverrsnittet av kvartsgangene for å sjekke om det har vært en termal gradient fra tidlig kvartsløsning til siste kvartsløsning. Inneslutningene som er valgt er delt inn i tre hovedgrupper: nærmest sidesteinen sammen med sulfider (tidlig) det vil si første-generasjon kvarts og overgangen fra første- til andre-generasjon, senere utkrystallisert kvarts (midlere), det vil si midt i andre-generasjon kvarts og sist utkrystallisert kvarts (sen), det vil si slutten av andre-generasjon kvarts (Figur 3). Dersom man ser på inneslutningsdata fra tidlig, midlere og sen kvarts, kan det se ut som om temperaturen (homogeniseringstemperaturen) er høyere for sen kvarts enn for tidlig kvarts i NS-gangen. Det ser med andre ord ut til at det har vært et oppvarmende system i NS-gangen. I ØV-gangen ser det derimot ut til å ha vært et avkjølede system. Forutsetningen her er at trykket har vært konstant. Saliniteten i løsningene, fra tidlige til sene, ser ut til å øke i NS-gangen, mens de avtar i ØV-gangen (Figurene 6 og 7). Variasjonene i temperaturene for tidlig, midlere og sen kvarts ligger utenfor usikkerheten for homogeniseringstemperaturer, ± 2°C. Tendensene observert i NS- og ØV-gangene kan derfor ikke skyldes usikkerhet i avlesningene.

Figur 4.

Oversikt over salinitet og homogeniseringsstemperatur for Fiskum-forekomstene.

a. Salinitet angitt i wt% NaCl ekvivalenter.

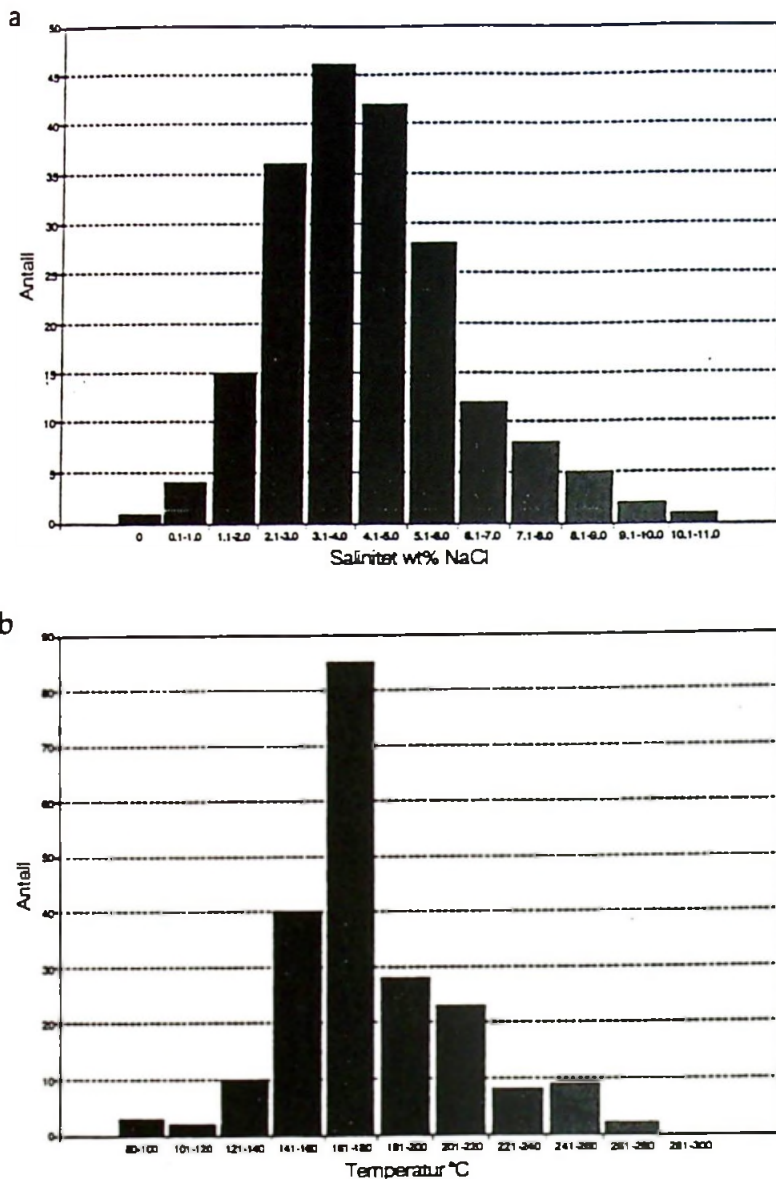
b. Homogeniseringsstemperatur.

I forekomst 1 og 29 (Figur 2) er det observert at NS-gangen er eldre enn ØV-gangen. Det kan derfor betyr at løsningene sirkulerte først i NS-sprekkene, og at løsningenes temperatur og salinitet økte med tiden. Etter at NS-sprekkene var tettet kan ØV-sprekkene ha blitt dannet, og løsningene kan så ha begynt å sirkulere i disse sprekkene. Her avtar temperatur og salinitet ifølge analyser gjort på forekomst 73 (Figur 2). De høyeste målte temperaturene som viser seg å være i ØV-gangene, kan bety at krystalliseringen i ØV-gangene begynner å skje før/mens løsningene har oppnådd/oppnår høyeste temperatur.

Stabile Isotopanalyser

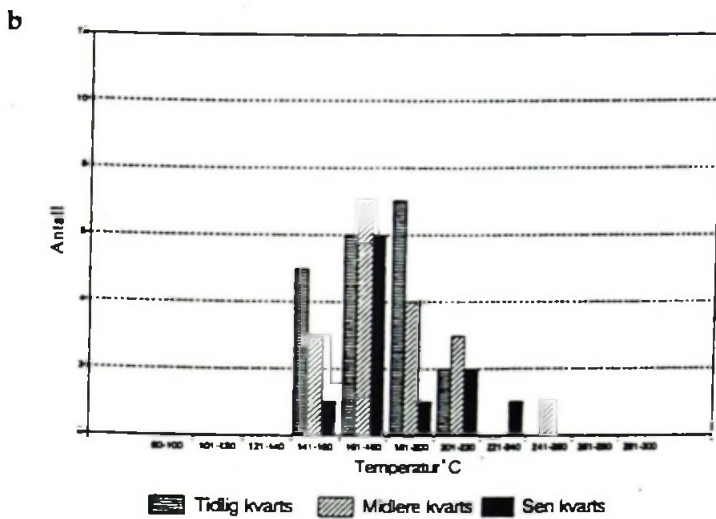
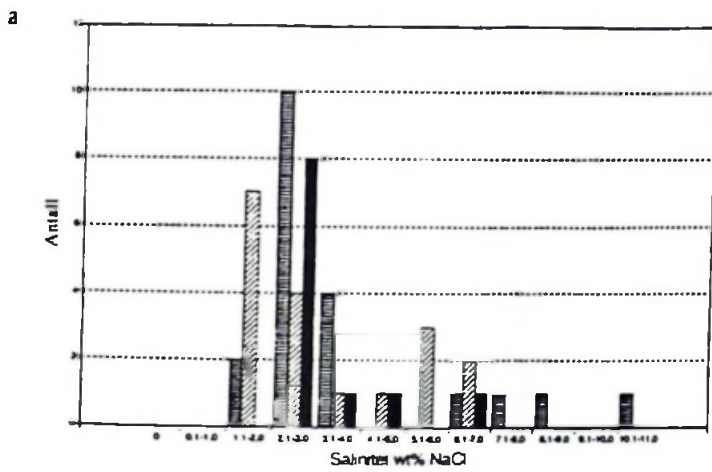
KARBONMATERIALET

Det er tatt prøver av karbonmaterialet fra kvartsgangene som inneholder kullblende, og prøver av alunskiferen over kontakten mellom Prekambrium og Kambrium (79-84, Figur 2), for å gjøre $\delta^{13}\text{C}$ -analyser. Den totale analytiske presisjon er beregnet å ha et standardavvik på $\pm 0.08\text{‰}$. Sammen med prøvene av karbonmateriale og kullblende er det også analysert en grafitt standard, GC (= General Graphites), med $\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})} = -25.94 \pm 0.08\text{‰}$. Det viste seg at de analyserte standardene lå 0.3‰ over standardverdien. Avviket ble derfor trukket fra de målte $\delta^{13}\text{C}$ -verdiene for karbonmateriale, skifer og kullblende. $\delta^{13}\text{C}$ for kullblende og karbonmateriale har tilnærmet samme verdier (Figur 7). Det vil si at $\delta^{13}\text{C}$ -verdiene har størst hyppighet rundt -30‰ , som er typisk for organiske sedimentære bergarter (Faure 1986). $\delta^{13}\text{C}$ -verdiene til alunskiferen har også størst hyppighet på -30‰ . $\delta^{13}\text{C}$ -analysene indikerer at karbonmaterialet opprinnelig kan ha vært alunskifer. Av de data som er tilgjengelig for øyeblikket kan det derfor slutes at karbonmaterialet som finnes i Fiskum-forekomstene mest sannsynlig er biter av alunskiferen. Feltobservasjoner støtter også denne teorien.

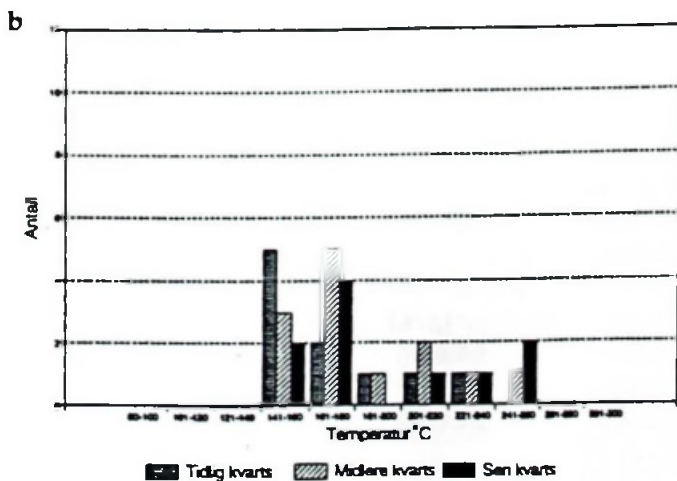
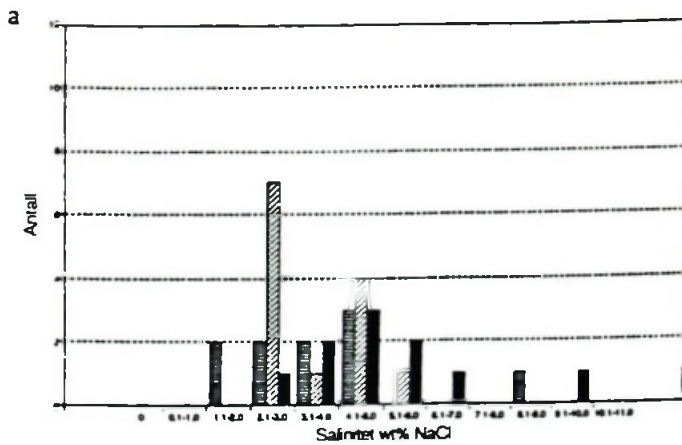


KARBONATER

Det er tatt prøver av kalkspat i Fiskum-forekomsten der det har vært mulig å finne, for å gjøre $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analyser. De få prøvene som ble tatt var små og enkelte var korrodert. Den totale analytiske presisjon er beregnet å ha et standardavvik på $\pm 0.1\text{‰}$ for både $\delta^{13}\text{C}$ og $\delta^{18}\text{O}$. Sammen med kalkspatprøvene ble det også gjort analyser av kalkspat standard STK-1 ($\delta^{13}\text{C}_{(\text{PDB})} = -3.9 \pm 0.1\text{‰}$ og $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SMOW})} = 6.8 \pm 0.1\text{‰}$) som viste at $\delta^{13}\text{C}$ - og $\delta^{18}\text{O}$ -analysene ikke hadde avvik utenfor standardavviket. $\delta^{13}\text{C}$ i kalkspat har sine hyppigste verdier rundt -9‰ (Figur 7). Fraksjonering med hensyn til $\delta^{13}\text{C}$ mellom grafitt og kalkspat er ca. 15‰ ved 200°C , når grafitt og kalkspat dannes i likevekt med hverandre (Taylor 1979, forutsatt rent vann). De målte $\delta^{13}\text{C}$ -verdiene i kalkspat og karbonmaterialet fra Fiskum-forekomstene har i enkelte tilfeller en differanse på ca. 15‰ (Figur 7). Dersom det forutsettes at kalkspat og grafitt er dannet i likevekt med hverandre, tyder dette på at kalkspat i Fiskum-forekomstene har fått karbonet sitt fra karbonmaterialet som opptrer i forekomstene.



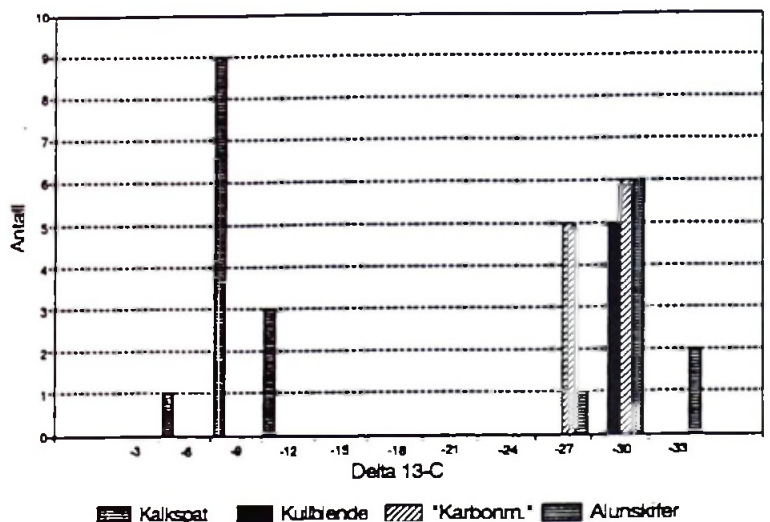
Figur 6.
Salinitet og homogeniserings-
temperaturer fra forekomst 73 (Figur
2). Gangene har ØV strøkretning. Det
er gjort væskeinneslutnings-
mikrotermometri på tidlig kvarts,
midlere kvarts og sen kvarts.
a. Salinitet angitt i wt% NaCl ekviva-
lenter.
b. Homogeniseringstemperatur.



Figur 5.
Salinitet og homogeniserings-
temperaturer fra forekomst 49 (Figur
2). Gangene har NS strøkretning.
Det er gjort væskeinneslutnings-
mikrotermometri på tidlig kvarts,
midlere kvarts og sen kvarts.
a. Salinitet angitt i wt% NaCl ekvi-
valenter.
b. Homogeniseringstemperatur.

Figur 7

$\delta^{13}\text{C}$ -analyser angitt i ‰ fra Fiskum-området. Analysene er gjort på kalkspat, kullblende, "karbonmateriale" og alunskifer. Første intervall til venstre på x-aksen gjelder $\delta^{13}\text{C}$ -verdiene mellom 0 til -3, neste gjelder -3.1 til -6.0 osv.



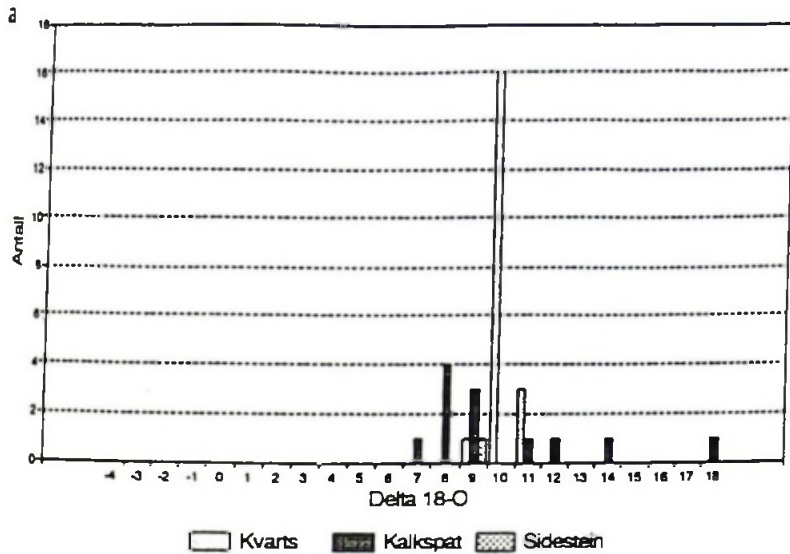
Figur 8a viser fordelingen av $\delta^{18}\text{O}$ i kalkspat. Verdiene har størst hyppighet rundt 8 ‰, men varierer svært. Dersom temperaturen i løsningene som avsatte Fiskum-forekomsten var ca. 200°C, ville fraksjoneringen mellom kalkspat og løsning i likevekt, være 9.5 ‰ (Taylor 1979, forutsatt rent vann). Beregninger viser at $\delta^{18}\text{O}$ -verdiene for løsningene som felle ut kalkspat i Fiskum-forekomstene har størst hyppighet rundt -2 ‰ (Figur 8b). Segalstad (pers. medd.) har målt $\delta^{18}\text{O}$ i kvarts fra Fiskum-forekomstene. $\delta^{18}\text{O}$ verdiene i kvartsen har størst hyppighet på rundt 10 ‰ (se Figur 8a) med svært liten variasjon. Likevektsfraksjoneringen mellom avsatt kvarts og løsning er 12.2 ‰ for 200°C (Taylor 1979, forutsatt rent vann). Beregnet verdi for løsningen i likevekt med kvarts får da størst hyppighet på rundt -2 ‰ (se Figur 8b). Det er også gjort $\delta^{18}\text{O}$ -analyser av sidesteinen, som har ca. 9 ‰ (estimert gjennomsnittsverdi for Kongsberggneisene fra analyser gjort av Segalstad, pers. medd.). Likevektsfraksjoneringen mellom alkalifeltspat og løsning er 11 ‰ ved 200°C (Taylor 1979, forutsatt rent vann). Beregnet verdi for en vandig løsning i likevekt med alkalifeltspat blir da -2 ‰. Alkali feltspat er valgt å representere hel bergart fordi bergartene i Fiskum-området har en stor andel med feltspat (Jakobsen 1975). $\delta^{18}\text{O}$ verdiene gir oss ikke noen indikasjoner på hvilke(n) kilde(r) løsningene som avsatte Fiskum-forekomstene hadde. De viser bare at løsningene var i nær isotopisk likevekt med sidesteinen da kvarts og kalkspat ble felt ut. Det ser ut som om løsningene sirkulerte i bergartene over lengre tid slik at de fikk tid til å ekvilibrere seg isotopisk med sidesteinen. Slike løsninger har blitt kalt «skorpevann» (Segalstad og Ohmoto 1986), og kan passe med vann oppvarmet av den geotermiske gradient (se under væskeinneslutnings-mikrotermometri). Den ensartede $\delta^{18}\text{O}$ for gang-kvartsen i Fiskum-området stemmer også med en slik hypotese.

Datamodelleringer

Det er brukt tre geokjemiske modelleringsprogrammer (FO2PH, GEOMOD og MIN-MELT) for å finne hvilke komplekser som har dominert transporten av metallene i Fiskum-forekomstene, hvilke utfellingsmekanismer som har forårsaket utfelling av mineralene, og om utfellingen er skjedd i åpent eller lukket system. Det vil her bli oppsummert resultatene av disse modelleringene. Mer detaljer om programmene forutsetninger osv, er å finne i Frøyland (1992).

FO2PH

Figur 9 viser stabilitetsfeltene i et $f\text{O}_2$ -pH diagram for mineralene som er tilstede i Fiskum-forekomstene (+ noen mineraler som ikke er observert i forekomstene, disse er merket med stiplet linje) ved 200°C og et estimert hydrostatisk trykk på 300 bar. Diagrammet bygger på resultater fra FO2PH-modelleringer. Deler av pyritt-stabilitetsfeltene er felles med kobberkis-stabilitetsfeltet. Karbonmateriale opptrer i alle kvartsgangene i Fiskum-forekomstene. Materialet har bufret løsningene med hensyn på oksygenfugasitet, ved hjelp av CO_2 - CH_4 bufferen (som ligger i området for grafitt stabilt), under hele eller mot slutten av transporten og under utfelling. Pyritt og magnetkis er til stede i Fiskum-forekomstene samtidig. Hvis løsningene er bufret av CO_2 - CH_4 bufferen, må grensen mellom pyritt og magnetkis ligge innenfor grafitt stabilt området (Figur 9). Modelleringene viser at dette er mulig når temperaturen er 200°C men ikke ved 180°C, med de benyttede utgangsdataene (Figur 9 og Frøyland 1992). Ved 200°C er $\Sigma\text{S} = 0.0005$ m den mest sannsynlige svovelkonsentrasjon ifølge modelleringene ved hjelp av FO2PH. Høyere molalitet av totalt svovel, (forutsatt at de andre konsentrasjonene holdes uforandret), resulterer i at grensen mellom pyritt og magnetkis faller under området for grafitt stabil (det vil si lavere $f\text{O}_2$ -verdi enn grafitt). Dersom modelleringene gjøres med lavere totalt svovel, vil bare magnetkis være stabil i grafittområdet. Beregningene gjort for stabilitetsområdet for vandige sink-

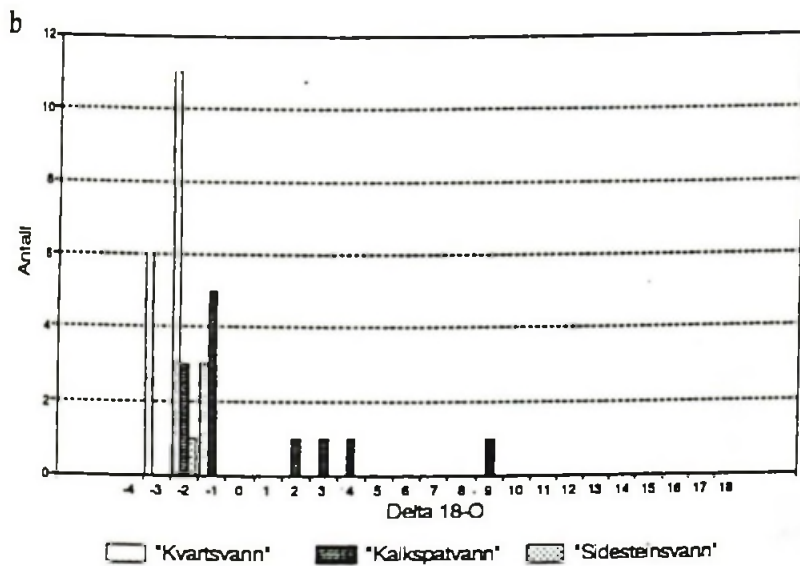


Figur 8.
 $\delta^{18}\text{O}$ -analyser angitt i ‰ fra Fiskum-området.

a. $\delta^{18}\text{O}$ -analyser gjort på kalkspat, kvarts og sidebergart.

b. Beregnede $\delta^{18}\text{O}$ -verdier for løsnings- og likevekt med kalkspat (= "kalkspatvann"), kvarts (= "kvartsvann") og sidebergart (= "sidesteinsvann").

Første intervall til venstre på x-aksen gjelder verdiene -5.0 til -4.1, neste gjelder -4.1 til -3.0 osv.



komplekser (i et fO_2 -pH diagram), viser at transport av vandige sinkkomplekser er mest gunstig for pH-verdier lavere eller lik 4 når temperaturen er 200°C. Resultatene fra den geokjemisk modellering med FO2PH-programmet viser at transport av metallene i løsningsene som sirkulerte i Fiskum-området kan ha skjedd ved tilnærmet konstant fO_2 , og pH lavere enn 4. Pilen i Figur 9 angir en mulig utfellingsreaksjon for mineralene i Fiskum-forekomstene, økende pH og konstant fO_2 .

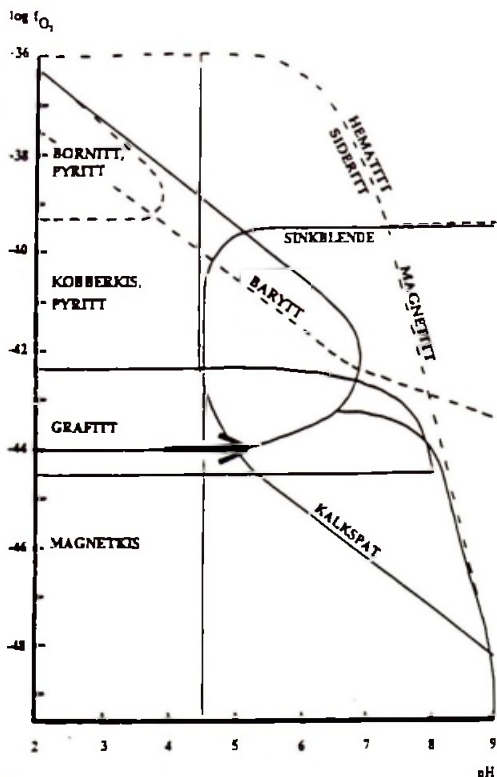
GEOMOD

Med resultatene fra FO2PH-modelleringen, væskeinnslutnings-mikrotermometrien, estimert ΣC til 0.1 m og $\Sigma\text{S} = 0.005$ m, er løselighet av bly-klorid-/sulfidkomplekser og av sink-klorid-/sulfidkomplekser beregnet med hjelp av dataprogrammet GEOMOD. Modelleringer med GEOMOD viser at løselighet for alle typer bly-/sink-komplekser er høyest for pH = 4 og temperatur = 300°C. De viser også at kloridkompleksene ZnCl_4^{2-} og PbCl^+ (Figur 10) dominerer over andre kloridkomplekser og alle sulfidkompleksene.

MIN-MELT

Ved hjelp av MIN-MELT kan man beregne endringene av $\delta^{18}\text{O}$ -verdiene for løsning og mineral etterhvert som utfellingen skjer i et lukket system. Det viser seg at etterhvert som mer og mer kalkspat felles ut, forandrer de modellerte $\delta^{18}\text{O}$ -verdiene til kalkspat seg innenfor intervallet for de målte verdiene til kalkspatprøver funnet i Fiskum-forekomstene. Dette er tilfellet for til og med 70% kalkspatutfelling (Figur 11). Disse data støtter en hypotese om at kalkspat kan være felt ut i et lukket system. For kvarts og løsningen i likevekt med kvarts viser det seg at for mellom 40 og 70 % utfelt mineral, gir de modellerte $\delta^{18}\text{O}$ -verdiene samme verdier som målt for kvarts fra Fiskum-forekomstene (Figur 11). De målte dataene i kvarts fra Fiskum-forekomstene varierer svært lite sammenlignet med modellerte verdier for kvarts felt ut i et lukket system. Det kan derfor se ut til at kvartsen i Fiskumforekomstene er felt ut i et åpent system. Dette stemmer også med feltobservasjoner. Kvartsen ser ut til å være krystallisert i et åpent system der det har vært mulig å danne pene og lange (opptil 5 cm lange) kvartskrys-

taller. Kalkspaten, derimot, der den er til stede, tetter tilsynelatende igjen åpne hulrom i midten av gangene.



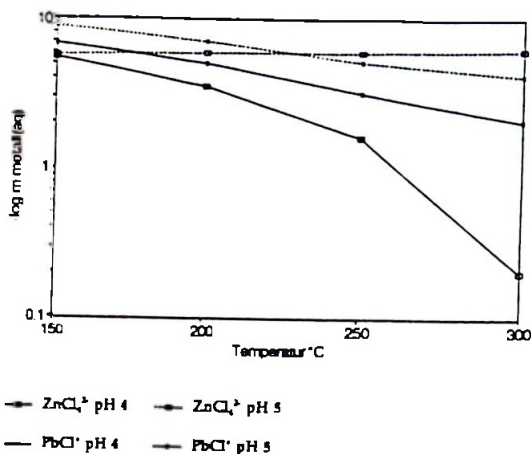
Figur 9.

Diagram som viser $\log fO_2$ -pH konstruert ved hjelp av dataprogrammet FO2PH. Diagrammet gjelder for 200°C, 4 wt% NaCl, $\Sigma S = 0.0005m$ og $\Sigma C = 0.1m$ (andre parametre se Frøyland 1992). De stiplede stabilitetslinjene gjelder for mineraler som ikke er observert i Fiskum-forekomstene (magnetitt, hematitt, sideritt, bornitt og barytt). Pilen viser hvilke oksygenfugasiteter og pH-forhold mineralene i Fiskum-forekomstene er tolket å ha utkrystallisert ved (se diskusjon i teksten).

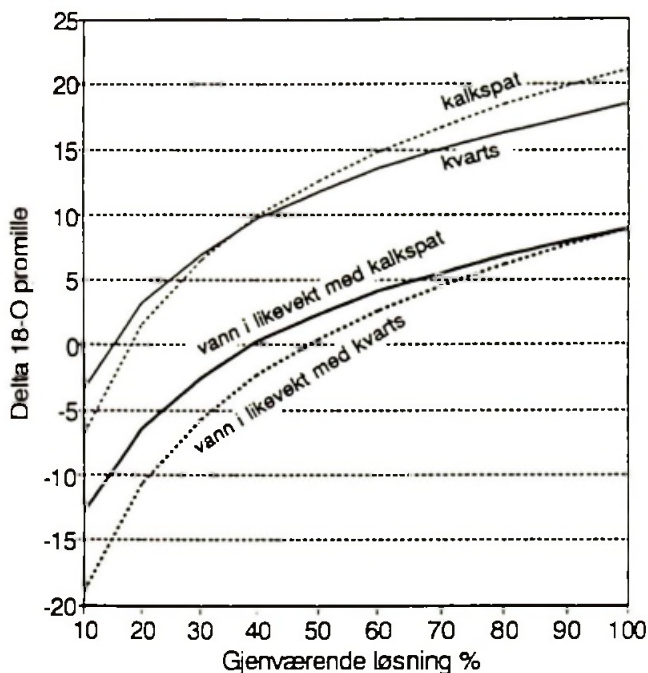
DISKUSJON

Dannelsen av sprekkene i Fiskum-området

Bitene med karbonmateriale kan, ifølge feltobservasjoner og $\delta^{13}C$ analyser, se ut til å være biter fra alunskiferen. Dersom dette er tilfellet må oppsprekningen ha skjedd før mineraliseringen, slik at biter fra den overliggende alunskiferen har fått tid til å ramle ned i sprekkene. Bitene kan ikke vitne om oppsprekningen har skjedd helt opp til overflaten, eller bare opp til alunskiferen. Forkastningssprekker på flere km er beskrevet før for dannelsen av Oslo-riften (Dons og Larsen 1978). Dessuten viser modelleringer gjort ved hjelp av dataprogrammet MIN-MELT at kvarts kan være felt ut i et åpent system. Ut fra dette kan det se ut som at sprekkene i Fiskum-området nådde opp til overflaten, på den tiden ca. 3 km, og at oppsprekningen skjedde før



Figur 10. Diagram som viser $\log m$ metall oppløst mot temperatur modellert ved hjelp av dataprogrammet GEO-MOD. Diagrammet viser de viktigste kompleksene for bly og sink ved pH = 4 (opptrukne linjer) og pH = 5 (stiplede linjer) ved CO_2-CH_4 bufferen, 4 wt% NaCl, $\Sigma S = 0.0005m$ og $\Sigma C = 0.1m$.



Gjenværende løsning i %	$\delta^{18}O$ for vann i likevekt med kalkspat	$\delta^{18}O$ for kalkspat	$\delta^{18}O$ for vann i likevekt med kvarts	$\delta^{18}O$ for kvarts
100	9.0	18.5	9.0	21.2
90	8.0	17.5	7.7	19.9
80	6.9	16.4	6.3	18.5
70	5.6	15.1	4.6	16.8
60	4.1	13.6	2.7	14.9
50	2.4	11.9	0.5	12.7
40	0.3	9.8	-2.2	10.0
30	-2.5	7.0	-5.7	6.5
20	-6.3	3.2	-10.6	1.6
10	-12.8	-6.7	-18.9	-3.3

Figur 11.

Diagram som viser $\delta^{18}O$ som funksjon av mineralutfelling i et lukket system. Diagrammet er modellert ved hjelp av dataprogrammet MIN-MELT. Diagrammet viser fordeling av $\delta^{18}O$ mellom kvarts og vann, og mellom kalkspat og vann som funksjon av mineralutfelling. Tabellen viser verdiene som ligger til grunn for diagrammet.

mineralisering. Trykket som var tilstede under mineraliseringen kan derfor se ut til å ha vært hydrostatisk. Et hydrostatisk trykk tilsvarende 3 km vannsøyle er her satt som et mulig trykkestimat for dannelsesstemperaturene i Fiskum-forekomstene.

På grunnlag av observasjonene i to forekomster (1 og 29, Figur 2) som viser at NS-sprekkene ble dannet før ØV-sprekkene, Slickenside-strukturene som viser ekstensjon i NS-sprekkene og kompresjon i ØV-sprekkene og væskeinneslutningsmikrotermometri, blir det her skissert en mulig dannelsesmodell for sprekkene i Fiskumområdet. Ekstensjons-sprekker med NS-retning ble dannet først på grunn av dannelsen av Oslo grabenen. Hydrotermale løsninger begynte å sirkulere i NS-sprekkene og avsatte etterhvert mineralene i dem. Deretter har kraftfulle plutoner intrudert det sørlige Oslofeltet (Ekeritten og Larvikitten) og vært årsak til dannelsen av ØV-kompresjonssprekker i Fiskum-området. På grunn av uttømmingen fra magma under Fiskum og Kongsberg-området falt «platen» som Fiskum-området ligger på ned mot SØ og åpnet ØV-sprekkene. Hydrotermale løsninger kom til og avsatte mineralene i ØV-sprekkene. Siden ØV-sprekkene ser ut til å føre de største forekomstene (sølvforekomstene på Kongsberg er ØV-sprekker, Bugge 1917), kan dette skyldes en større hydrotermal aktivitet etter at NS-sprekkene ble tettet igjen, og ØV-sprekkene ble åpnet.

Kilden til løsningene

Beregnete $\delta^{18}\text{O}$ -verdier for løsningene viser at de er i likevekt med sidebergarten. Det er derfor vanskelig å si hvilke(n) kilde(r) de hydrotermale løsningene som avsatte Fiskum-forekomstene har hatt. Løsningene har hatt tilsynelatende tid nok til å ekvibrere seg med sidesteinen, og er derfor blitt kalt for skorpevann (Segalstad og Ohmoto 1986). Modelleringer tyder på at løsningene kan ha hatt lave konsentrasjoner av metaller. Mikrotermometriske væskeinneslutningsanalyser viser at temperaturene har vært rundt 200-300°C, og saliniteten har vært ca. 4 wt% NaCl-ekvivalenter. Dette er ikke typiske verdier for magmatiske løsninger, som opptrer med høyere temperaturer og saliniteter (Evans 1987). Løsningene ser derfor ikke ut til å være magmatiske. De ser ut til å være meteoriske, metamorfe og/eller formasjonsvann, som enten har hatt $\delta^{18}\text{O}$ forhold i likevekt med sidesteinen, eller som har hatt tid til å ekvibrere med sidesteinen.

Dersom løsningene opprinnelig var porevann som senere ble varmet opp, har de hatt tid nok til å ekvibrere med bergarten hvor de har opptrådt. Løsningene kan også ha sirkulert i bergartene over lengre tid, før utfellingen av mineralene skjedde, og på den måten fått tid til å ekvibrere seg med sidesteinen. Konglomeratet som ligger i kontakten mellom kambriske sedimenter og prekambriske gnei-

ser kan ha virket som en kanal for løsningene der de kan ha oppholdt seg over lengre tid, eller bare sirkulert gjennom. Denne teorien er også fremlagt av Segalstad (1982). Det er observert mineralisering i konglomeratet, som kan være med på å støtte teorien om konglomeratet som en kanal (aquifer) for løsningene. Det er vanskelig å si hvor løsningene kom fra og hvordan de opptrådte. Den mest sannsynlige teorien ser ut til å være at løsninger strømmet gjennom konglomeratet og sank ned i sprekkene i det Oslo grabenen ble dannet. Løsningene ble oppvarmet og begynte å bevege seg opp mot konglomeratet igjen, ble avkjølt, sank ned i sprekkene igjen, varmet opp og beveget seg opp til konglomeratet igjen. På den måten kan det ha oppstått en konvektiv bevegelse av løsningene fra konglomeratet ned i sprekkene og opp til konglomeratet igjen.

Løsningenes varmekilde

Mineraliseringen i Fiskum-forekomstene er antatt å ha skjedd på ca. 3 km dyp, basert på stratigrafisk rekonstruksjon. Analyser viser en enhetlig temperatur ca. 200°C og geokjemisk sett relativt ensartet løsninger i Fiskum-området, som kan reflekterer løsninger oppvarmet av den geotermiske gradient. Denne må i så tilfellet ha vært ca. 60°C/km for å gi ca. 200°C på 3 km dyp. Denne gradienten er kompatibel med gradienten for aktive kontinentale rifter, hvor den er 2-3 ganger større enn stabile kratoner (Smith og Jones 1979).

Kilden til karbon

$\delta^{13}\text{C}$ gjort på kalkspat, karbonmaterialbitene og alunskifer viser at karbonmaterialet kan være biter av alunskifer, og at karbonmaterialet og/eller alunskiferen, er en sannsynlig kilde for karbonet i kalkspat.

Kilden til klorid

Saltkonsentrasjoner i de undersøkte væskeinneslutningene har ikke typisk magmatiske konsentrasjoner. De mengdene med klor som er tilstede, kan ha blitt utlutet fra de sedimentære bergartene som i Permiden lå over de Prekambriske bergartene i Fiskum-området, for eksempel alunskiferen. Det er analysert 14 ppm Cl i alunskiferen (Christie 1975). Løsningene kan ha lutet ut klorene fra bitene i sprekkene og/eller vært i kontakt med alunskiferen som er antatt å ha ligget over Fiskum i Perm. Etterhvert som løsningene ble varmere, løste de opp mer og mer klor fra alunskiferen. Klorene har virket som oppløsning- og transportmiddel for metallene.

Kilden til svovel

Modelleringer viser at løsningene som sirkulerte i Fiskum-området var svovelfattige. Svovelet som reagerte med de vandige metallkompleksene og felte ut sulfidene i Fiskum-forekomstene, kan ha blitt tilført løsningene på utfellingstedet, og ikke transpor-

tert med i løsningen. Alunskiferen og/eller karbonmaterialet kan ha vært en mulig kilde til svovelet. Dersom det forutsettes at karbonmaterialet stammer fra alunskiferen viser mengdeberegninger at karbonmaterialet alene kan være kilden til svovelet. Dersom løsningene i tillegg har vært i kontakt med overliggende alunskifer, er det ikke tvil om at alunskiferen kan ha vært svovelkilden til metallsulfidene.

Svovelisotopanalyser gjort på sinkblende, kobberkis, blyglans (Segalstad pers. medd.) og magnetkis og pyritt fra alunskifer (Segalstad 1982 og pers. medd.) viser at alunskifer-svovelet har høyere verdier enn svovelet fra Fiskum-forekomstene. En mulig forklaring på de lavere verdiene som er målt for svovelet i Fiskum-forekomstene, kan være en svovelkilde nummer to med lavere $\delta^{34}\text{S}$ verdier enn alunskiferen, for eksempel fahlbåndene (Segalstad 1982). En blanding av disse to kildene kan gi verdiene som er målt på sulfidene fra Kjennerudvann. Disse to kildene er også funnet å være mulige kilder for metallene i forekomstene langsmed den vestre siden av Oslofeltet (Segalstad 1985 b). Det er ikke observert fahlbånd i forbindelse med alle forekomstene, men fahlbånd er vanlige i Kongsbergfeltet (Bugge 1917) og kan eksistere i dypet.

Kildene til metallene

Det er gjort blyisotop-analyser på blyet fra noen Fiskum-forekomstene (Bjørlykke 1989). Isotopene viser at blyet er radiogent og reflekterer øvre skorpe som kilde. Alunskiferen og fahlbåndene kan være mulige kilder for metallene. Alunskiferen har et høyt U/Th forhold som ikke er observert å reflektere blyisotopdataene ut fra den modellen Bjørlykke (1989) har benyttet. Ifølge Moorbath og Vokes' (1963) modell, kan bly fra alunskiferen tilfredsstille de observerte blyisotop-data, men utelukker ikke at bly også kan ha kommet fra de prekambriske gneiser i området. Fahlbåndene inneholder lite bly (Bugge 1917), og er derfor ikke den mest sannsynlige blykilden. Dersom kilden til blyet er en blanding av permisk bly og bly fra alunskiferen, støtter det blyisotop-analysene til Moorbath og Vokes (1963). Lokale intrusjoner kan også ha bidratt med noe permisk bly. Det kan altså her være snakk om en blanding av bly fra alunskiferen og permiske intrusjoner. Der-

som det igjen forutsettes at karbonmaterialet stammer fra alunskiferen, viser mengdeberegninger at karbonmaterialet alene kan være kilden til alle metallene, Zn, Pb og Cu. Geokjemiske modelleringer viser at kobber kan være plukket opp fra fahlbånd (Segalstad pers. medd.).

Det ser ut til at alunskiferen teoretisk sett kan være en mulig kilde til metallene og svovelet alene, men andre kilder, slik som permiske intrusjoner som kilde for bly, og fahlbåndene som kilde for kobber og svovel kan ikke utelukkes. Løsningenes konsumering av metaller fra ulike kilder kan ha skjedd ved hjelp konveksjons-teorien presentert under "Vannets kilde".

Transport

Barnes (1979) definerer 10 ppm oppløst metall som minimumsmengde for en malmløsning (10 ppm Zn 2×10^{-4} m, og 10 ppm Pb 5×10^{-5} m). Det viser seg at en løsning med pH = 4 og temperatur på 200°C ved de oppførte forutsetninger er i stand til å transportere mer enn 10 ppm Zn, men temperaturen må være over eller lik 240°C for at 10 ppm Pb skal transporteres ved pH = 4 (Figur 10). Med andre ord, en løsning på 240°C ved pH = 4 og med konsentrasjonene listet under avsnittet om FO2PH- og GEO-MOD-programmet, er i stand til å transportere nok Pb og Zn, som kloridkomplekser, til å kalles en malmløsning (i henhold til Barnes definisjon). Transport kan ha skjedd ved 240°C eller høyere temperatur før løsningene nådde Fiskum-området der løsningene ble avkjølt til ca. 200°C.

Utfelling

Ved hjelp av malmmikroskopi er parageneserekkefølgen av sulfidene funnet:

Pyritt → sinkblende → magnetkis → kobberkis → blyglans.

Feltobservasjoner forteller at det er dannet kvarts under hele parageneserekkefølgen i Fiskum-forekomstene, mens kalkspat er siste dannede mineral (bortsett fra sen kvarts uten sulfider, pseudomorfose). Dannelsen av Fiskum-forekomstene kan da oppsummeres som i Tabell 1.

Kvarts
Pyritt	?????
Sinkblende
Magnetkis
Kobberkis
Blyglans	...
Kalkspat	..

Tabell 1

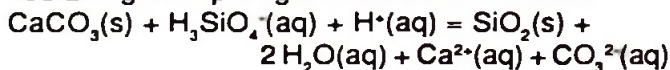
Mulig parageneserekkefølge av mineralene i Fiskum-forekomstene. Det er usikkert om pyritt er hydrotermalt avsatt eller var på avsetningsstedet. (Tid langsmed x-aksen).

Den geokjemiske modellering viser at dersom fO_2 er konstant og pH øker fra 4 til 5 (se pilen i Figur 9), kan det forårsake utfelling av sinkblende og kalkspat. Det er ikke gjort modelleringer for blyglans fordi FO2PH ikke har data for løselighet av blyglans. GEOMOD modelleringene viste at for å løse opp 10 ppm bly må temperaturen være høyere og pH lavere enn for å løse opp 10 ppm sink. Teoretisk ville derfor stabilitetsfeltet for blyglans stabil være forskjøvet mot lavere pH i forhold til stabilitetsfeltet for sinkblende stabilt i Figur 9. Det vil si at blyglans teoretisk skal felles ut før sinkblende ved pH økning, forutsatt metning med hensyn på blyglans og sinkblende. Resultatene fra GEOMOD modelleringene viser at dersom pH økes fra 4 til 5 og temperaturen holdes konstant, vil løselighetene for både Pb og Zn avta med ca. 2 log-enheter. Det vil si at dersom løsningen var mettet med hensyn til oppløst Pb og Zn, ville ca. 2 logenheter av oppløst bly og sink felles ut ved en pH-økning fra 4 til 5. Dette tilsvarer en utfellings-effektivitet på opptil 99%. Dersom pH holdes konstant og temperaturen senkes fra 300 til 200°C, vil løselighet av Pb og Zn også i dette tilfellet avta med ca. 2 log-enheter. Det vil si at opp til 99% av disse oppløste metallene vil kunne felles ut. En pH-økning som effektiv utfellingsmekanisme for sinkblende og kalkspat er også vist ved hjelp av fO_2 -pH diagrammene (Figur 10). Væskeinneslutningene viser ingen koking i løsningene på Fiskum. Koking kan derfor ikke ha forårsaket pH-økning. Reaksjoner med sidesteinen kan ha forårsaket pH-økning, men sidesteinsomvandling er sjelden i forbindelse med kvartsgangene. pH-økning på grunn av sidesteinsomvandling kan derfor ikke ha vært den dominerende utfellingsmekanismen for mineralene i Fiskum-forekomstene.

I følge GEOMOD-modelleringene kan avtagende temperatur være en effektiv utfellingsmekanisme for blyglans og sinkblende (forutsatt at løsningene nådde metning med hensyn til blyglans og sinkblende). Løselighet for H_2S i vann har et minimum i området 200-250°C avhengig av salinitet og trykk. Over ca. 250°C vil $\text{H}_2\text{S}(\text{aq})$ -mengden øke med økende temperatur, og under ca. 200°C vil $\text{H}_2\text{S}(\text{aq})$ -mengden øke med avtagende temperatur (Drummond 1981). Væskeinneslutningene viser at homogeniseringstemperaturen er 180°C, og FO2PH modelleringer viser at dannelsesstemperaturen må ha vært 200°C eller høyere. Løsningene kan ha nådd løselighetsproduktet til blyglans og sinkblende ved ca. 200°C nettopp på grunn av avtagende løselighet av H_2S .

Det kan se ut som om aktivitetsforholdene for de ulike metallkompleksene kan ha vært forskjellige i løsningene som avsatte Fiskum-forekomstene. Det kan se ut som om løsningene har vært tilnærmet mettet på Fe og Zn (med hensyn til pyritt/magnetkis og sinkblende), men undermettet på Cu (med hen-

syn til kobberkis) og Pb (med hensyn til blyglans). Med disse forutsetningene kan utfelling av mineralene i Fiskum-forekomstene forklares av en avtagende temperatur, der kvarts ble felt ut sammen med pyritt. Etter ytterlige temperaturfall ble sinkblende felt ut. Systemet lukket seg, O_2 avtok på grunn av utfelling av sinkblende, og magnetkis ble felt ut på bekostning av pyritt. Hele tiden ble kvarts felt ut. Temperaturen steg etter at pyritt, sinkblende og magnetkis var felt ut, men ikke nok til at sulfidene ble løst opp igjen. Kobberkis ble felt ut idet temperaturen steg. Deretter avtok temperaturen igjen, men heller ikke her nok til at kobberkis ble løst opp. Ved dette temperaturfallet kunne blyglans felles. Kalkspat ble felt ut til slutt enten på grunn av temperaturfall og/eller pH økning i det gjenlukkede systemet. Den siste utfellingen av kvarts løste opp kalkspat ved avtagende pH og felte ut kvarts i stedet:



SAMMENLIKNING AV FISKUM-FOREKOMSTENE OG KONGSBERG-FOREKOMSTENE

Fiskum-forekomstene er tolket å være 1. generasjonsgangene funnet i Kongsberg-forekomstene (Bugge 1917). Oftedal (1941) har også fremsatt en teori om at hydrotermale løsninger har sirkulert fra Oslofeltet og avsatt bly-/sink-forekomstene i Fiskum før de nådde Kongsberg og avsatte sølv-forekomstene. Det vil her bli gjort en sammenligning av data fra Fiskum-forekomstene og data fra Kongsberg-forekomstene (Johansen 1985, Segalstad et al. 1986) for å finne ut om dette kan være riktig.

- * Fiskum-forekomstene er hydrotermale bly-/sink-forekomster, og Kongsberg-forekomstene er hydrotermale tidlig dannede bly-, sink-, kobber-, og jernsulfider og senere sulfosalter, Co/Ni-arsenider, sølvsulfid og gedigent sølv.

- * Begge er dannet i permtiden.

- * Begge er dannet i vertikale sprekker. Fiskum-forekomstene opptrer i både NS- og ØV-ganger, mens Kongsberg-forekomstene opptrer stort sett bare i ØV-ganger.

- * Begge opptrer som hydrotermale sprekkefyllinger i metamorfe bergarter, eldre enn forekomstene.

- * Kvarts er det dominerende gangmineralet i Fiskum-forekomstene, mens kalkspat dominerer i de sølvførende deler av Kongsberg-forekomstene.

- * Varmekilden til Fiskum-forekomstene kan være den daværende geotermiske gradient i Osloriften. For Kongsberg-forekomstene er varmekilden usikker.

- * Kilden for metallene i Fiskum-forekomstene er tolket å være fahlbånd, alunskifer og muligens magmatisk for bly. I Kongsberg-forekomstene er metallkilden tolket å være alunskifer og områdets gneis-bergarter.

- * Løsningene i Fiskum-forekomstene er tolket å være skorpevann, mens i Kongsberg-forekomstene er det tolket å være et bidrag også fra meteorisk vann.

* Løsningenes salinitet i Fiskumfeltet var noe høyere enn for de tidlige løsningene i Kongsbergfeltet (Figur 12). De senere løsningene i Kongsbergfeltet hadde salinitet på 4 til 5 ganger høyere enn funnet i Fiskumfeltet.

* Gjennomsnittlig dannelsesstemperatur for Fiskumforekomstene var ca. 200°C, lignende temperaturer som for tidlig dannede sulfider i Kongsbergforekomstene (Figur 12). Under de senere mineraliseringene i Kongsbergforekomstene var temperaturen ca. 250-300°C. Antatt hydrostatisk trykk på ca. 300 bar i begge tilfeller.

* I Fiskumforekomstene opptrer pyritt, mørk sinkblende, magnetkis, kobberkis og sølvholdig blyglans. I Kongsbergforekomstene opptrer malmineralene gedigent sølv, sølvsulfider, pyritt, lys sinkblende, magnetkis, kobberkis, sølvfattig blyglans, o.s.v.

* Kloridkomplekser ser ut til å ha dominert transporten i begge typer forekomster.

* Flere avsetningsmekanismer er beskrevet for begge typer forekomster.

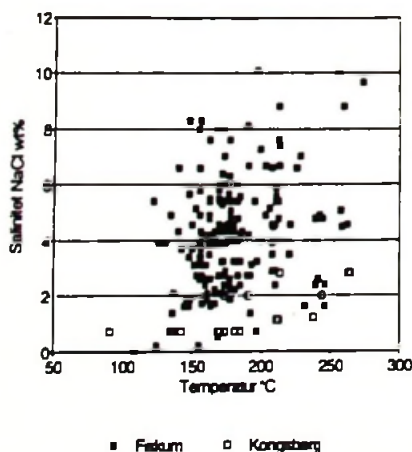
Fiskumforekomstene: Økende pH, avkjøling/oppvarming og avtagende ΣS i et gjenlukket system.

Kongsbergforekomstene: Sidesteinsreaksjoner, oppvarming og salinitetsfall.

Det ser ut til at Kongsbergforekomstene har hatt andre, kanskje lokale løsningskilder, som avsatt sølv. Derimot kan Fiskumforekomstene og 1. generasjonsgangene være avsatt fra samme løsninger.

Takk

Jeg vil rette en takk til Hans Jørgen Berg for å ha lest gjennom artikkelen og kommet med gode og konstruktive kommentarer.



Figur 12.

Diagram som viser homogeniseringstemperatur i °C mot salinitet i wt% NaCl. Sammenligning av væskeinneslutnings-mikrotermometriske data fra kvarts i Fiskumforekomstene og Kongsbergforekomstene (data fra Kongsberg er hentet fra Johansen 1985).

Litteratur

Barnes, H.L. (1979): Solubilities of ore minerals. I Barnes, H.L. (Ed.): *Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd ed.*, Wiley, 404-458.

Barret, T.J. & Anderson, G.M. (1988): The solubility of sphalerite and galena in 1-5M NaCl-solutions to 300°C. *Geochimica Cosmochimica Acta* 52, 813-820.

Bjørlykke, A. (1989): Metallogeny and lead isotope data from the Oslo Paleorift. *Tectonophysics* 178, 109-126.

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

Bugge, A. (1928): En forkastning i det sydnorske grunnfjell. *Norges Geologiske Undersøkelse* 130, 124 s.

Bugge, C. (1917): Kongsbergfeltets geologi. *Norges Geologiske Undersøkelse* 82, 272 s.

Christie, O.H.J. (1975): Three trace-element geological materials certified as a result of a co-operative investigation. *Talanta* 22, 1048-1050.

Dons, J.A. & Larsen, B.T. (1978): The Oslo paleorift. A review and guide to excursions. *Norges Geologiske Undersøkelse* 337, 199 s.

Drummond, S.E. Jr. (1981): Boiling and mixing of hydrothermal fluids: Chemical effects on mineral precipitation. *Ph. D. oppgave, The Pennsylvania State University*, 381 s.

Evans, A.M. (1987): An introduction to ore geology. 2nd ed., *Blackwell*, 358 s.

Faure, G. (1986): Principles of isotope geology. 2nd ed., *Wiley*, 589 s.

Frøyland, M. (1992): Geokjemi av bly-/sinkforekomstene på Fiskum, Øvre Eiker, Sør-Norge. *Cand. scient. oppgave, Universitetet i Oslo*, 142 s.

Glennie, H.A. (1966): Spektrografiske undersøkelser av sporelementer i blyglans og sinkblende med en del malmmikroskopiske data fra kvartsgangene i Kongsberg-Eiker området. *Cand. real. oppgave, Universitetet i Oslo*, 69 s.

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.

Jakobsen, S.B. (1975): Geochronological, geochemical and petrological investigations of Precambrian rocks in the Kongsberg Area. *Cand. real. oppgave, Universitetet i Oslo*, 239s.

Johansen, H. (1985): Geokjemi av hydrotermale prosesser i de sølvførende kalkspatganger på

- Kongsberg. *Cand. scient. oppgave, Universitetet i Oslo*, 229 s.
- Moorbath, S. & Vokes, F.M. (1963): Lead isotope abundance studies of galena occurrences in Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 43, 283-343.
- Oftedal, I. (1941): Untersuchungen über die Nebenbestandteile von Erzmineralien Norwegischer Zinkblendeführender Vorkommen. *Norske Vitenskaps-Akademi Skrifter I. Matematisk-Naturvitenskapelig Klasse 8*, 103 s.
- Segalstad, T.V. (1982): Geokjemi av stabile isotoper i Oslo-riften. *Geolognytt* 17, 44-45.
- Segalstad, T.V. (1985) b: Sølvdannelsen i Kongsberg sølvforekomster. I Nye malmtyper i Norge. *Malmgeologisk symposium, BVLI-Bergforskningen, Trondheim, Norge*, s. 100.
- 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, s. 555.
- Segalstad, T.V., Johansen, H. & Ohmoto, H. (1986): Geochemistry of hydrothermal processes at the Kongsberg silver deposit, Southern Norway. *Terra Cognita* 6, s. 511.
- Smith, D.L. & Jones, R.L. (1979): Thermal anomaly in Northern Mexico: An extension of the Rio Grande Rift? I Riecker, R.E. (Ed.): Rio Grande Rift: Tectonics and magmatism. *American Geophysical Union, Washington, D.C.*, 269-278.
- Starmer, I.C. (1991): The Proterozoic evolution of the Bamble Sector shear belt, Southern Norway: correlations across Southern Scandinavia and the Grenvillian controversy. *Precambrian Research* 49, 107-139.
- Taylor, H.P. Jr. (1979): Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. I Barnes H.L. (Ed): *Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd ed.*, Wiley, 236-277.
- Vogt, J.H.L. (1907): Über die Ertzgänge zu Traag in Bamble. *Zeitschrift für praktische Geologie*, 210-216.