



Bergvesenet

Postboks 3021, 7002 Trondheim

Rapportarkivet

Bergvesenet rapport nr BV 1695	Intern Journal nr	Internt arkiv nr	Rapport lokalisering Trondheim	Gradering
Kommer fra ..arkiv	Ekstern rapport nr LV 21	Oversendt fra	Fortrolig pga	Fortrolig fra dato:
Tittel Løkkenmalmens hydrotermale tilførselssone: omvandling, geokjemisk dispersjonsmønster og stockwork-mineralisering Bind I				
Forfatter Grenne, Tor		Dato 05.04 1984	Bedrift Orkla Industrier A/S	
Kommune Meldal	Fylke Sør-Trøndelag	Bergdistrikt Trondheimske	1: 50 000 kartblad 15213	1: 250 000 kartblad
Fagområde Geologi Geokjemi	Dokument type	Forekomster Løkken		
Råstofftype Malm/metall	Emneord			
Sammendrag Bilag til rapporten finnes i BV 1696				

ORKLA INDUSTRIER A/S

MINING SECTION
EXPLORATION

GULF ORKLA
LØKKEN VENTURE

Report no: LV 21 Date: April 5, 1984

Title: The hydrothermal feeder-zone of the
Løkken orebody:
Alteration, geochemical dispersion
patterns and stockwork mineralization

ORKLA INDUSTRIER A.s.

MINING SECTION, EXPLORATION

Report no: LV 21

Date: April 5., 1984

Title: Løkkenmalmens hydrotermale tilførselssone: Omvandling, geokjemisk dispersjonsmønster og stockwork-mineralisering.

The hydrothermal feeder-zone of the Løkken orebody:
Alteration, geochemical dispersion patterns and stock-work mineralization.

Prepared by: Tor Grenne

Area: Løkken

Map no., name: 1521 III Løkken

Coordinates (UMT):
NQ352996 - NQ 352000

Fields work period(s):

Pages: 38

Summer 1982

Enclosures: 14

Summary:

A description of geochemical and mineralogical alteration patterns, primary dispersion and sulphide mineralization related to a well-defined, deep sheet-like hydrothermal feeder-zone to the Løkken massive sulphide orebody is given, based on sampling in the mine and in two drill-holes. The results are compared to the situation at other deposits in the region, and apparent relationships between feeder-zone mineralogy/geochemistry and composition/size of the associated massive orebody are established. These relationships are discussed in the light of probable variations in the physico-chemical conditions of the hydrothermal feeder system, including parameters such as duration and intensity of the different systems. A brief discussion is given on the applicability of the feeder-zone approach in the prospecting for massive sulphides in the area.

Key words: Feeder-zone, hydrothermal alteration, primary dispersion, composition and size of massive sulphides.

<u>INNHOLD</u> (TABLE OF CONTENTS)	Side (Page)
Abstract (in English)	5
Sammendrag	7
Innledning	9
Prøvetaking og analyseteknikk	9
Geologi	10
Hydrotermal omvandling	12
Mineralogi	12
Geokjemi	14
CaO og Na ₂ O	14
K ₂ O	15
SiO ₂	16
Al ₂ O ₃	16
TiO ₂ , P ₂ O ₅ , Zr, Y og V	16
MnO	17
Sr	18
Svovel	18
Cu, Zn og Pb	18
Co	19
Ni og Cr	20
Hg	20
B	20
'Stockwork' mineralisering	21
Mineralogi	21
Kjemi	21
Cu	22
Ag	22
Co	22
Zn	22
Cd	23
Pb	23
Au	23
Ni og Cr	24
Mn	24
Sammenligning med andre områder	25
Diskusjon	26
Konklusjon	30
Anvendelsesmuligheter i malmløting	33

Conclusion (in English)	34
Applicabilities in ore prospecting	36

BILAG (ENCLOSURES)

1. Løkken-Høydal map, 1:50.000
2. Borhulls plassering (Location of drill-holes) 1:5.000
3. Analysetabeller (Table of analyses)
4. Borhullsdiagram (Drill-hole sections) 1:1.000
5. Geologisk vertikalsnitt (Vertical geological cross-section) 1:2.000
6. Gjennomsnittlig sammensetning av Løkkenmetavulkanitter (Average composition of Løkken metavolcanites)
7. Bergartsgeokjemi, variasjonsdiagram Gammelsjaktområdet (Lithogeochemistry, variation diagrams, Old Shaft area)
 - a. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O
 - b. MnO , TiO_2 , P_2O_5 , Zr , Y , V , Sr
 - c. Cr , Ni , Co , Zn , Cu , Pb , S , Hg
 - d. B , Ni/Cr , Y/Zr , TiO_2/Zr
8. Bergartsgeokjemi, variasjonsdiagram borhull 1 (1:1.000) (Lithogeochemistry, variation diagrams, drill-hole 1)
 - a. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O
 - b. MnO , TiO_2 , P_2O_5 , Zr , Y , V , Sr
 - c. Cr , Ni , Co , Zn , Cu , Pb , S , Hg
 - d. B , Ni/Cr , Y/Zr , TiO_2/Zr
9. Bergartsgeokjemi, variasjonsdiagram, borhull 2 (1:1.000) (Lithogeochemistry, variation diagrams, drill-hole 2)
 - a. SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O ,
 - b. MnO , TiO_2 , P_2O_5 , Zr , Y , V , Sr
 - c. Cr , Ni , Co , Zn , Cu , Pb , S , Hg
 - d. B , Ni/Cr , Y/Zr , TiO_2/Zr
10. Sulfidårer, geokjemisk variasjonsdiagram Gammelsjaktområdet (Sulphide veins, geochemical variation diagram, Old Shaft area)
 - a. S , Cu , Zn , Ag , Cd , Au
 - b. Mn , Cr , Ni , Co , Pb

ABSTRACT

Massive, stratiform sulphide orebodies within the ophiolitic sequences of the Løkken area were formed by precipitation on the seafloor directly above deep sheet-like hydrothermal feederzones. These represents localized upflow zones of large, seawater-fed convection systems driven by temperature gradients within the oceanic crust. Alteration in the downflow limbs of these systems, such as enrichment/depletion of K_2O , loss of Cu and oxidation of basalts still reflect to some extent their various physical and chemical conditions. Within the feederzones, the rapidly ascending hot solutions have reacted with the basalts to form predominantly chlorite-albite rocks which pass into chlorite-quartz rocks by progressive alteration. The degree of alteration thus appears to be related to the solution/rock ratio (i.e. the intensity and/or duration of the hydrothermal activity). Geochemically the feederzone rocks are characterized by strong depletion of CaO (and Sr), whereas Na_2O is generally enriched in peripheral parts and removed from central regions. Total iron is strongly enriched in chlorite-quartz rocks particularly in the lower parts; Fe depletion coupled to local enrichment of MgO in peripheral regions is interpreted as the result of some influx of ambient seawater. Other general features are loss of SiO_2 and K_2O from lower parts, and enrichment of the same elements in the uppermost parts of the feederzones where quartz-sericitic alteration with transitions into more peripheral albitic alteration is characteristic both at Løkken and Høydal mines.

Variations in sulphide mineralization (in the form of disseminations as well as veins), within the individual feederzones and also between different deposits, are related to variations in physico-chemical conditions. At Løkken, the hydrothermal solutions were able to ascend to the seafloor with insignificant or little sulphide precipitation, along the most central part of the zone. Lateral gradients (mainly in temperature ?) led to increased pyrite precipitation accompanied by enrichment of Cu (together with some Ag), Co, and Pb (together with Au) in successive zones towards the other parts of the feederzone. Zn is precipitated only in the most peripheral regions and partly outside where the hydrothermal solutions were likely to mix with the ambient seawater. Manganese followed Zn but formed an even wider dispersion halo, up to more than 70 metres out from the ca. 120 metres wide feeder channel. In the uppermost parts of the feederzone there was a marked increase in sulphide precipitation (including pyrite). Chalcopyrite is most enriched, whereas sphalerite shows the least increase such that sulphide veins here are characterized by a generally high Cu/Zn ratio. On the whole, however, the feederzone sulphides are low in both Zn,

Cd, Ni, Pb, Au, Co and Cu in relation to the stratiform sulphide body. The local enrichment in the uppermost regions as well as in the peripheral lower parts are accompanied by higher boron contents within the alteration rocks, suggesting admixture of cold seawater as an important mechanism for precipitation here. At the Høydal deposit, the solubility of most elements analysed was exceeded - to a much greater extent than at Løkken - already in the lower parts of the feeder zone (possibly as a consequence of more extensive seawater influx). Most of the Cu, therefore, was lost before the ascending solutions reached the sea-floor, and also Zn and Mn have precipitated and are enriched throughout the feederzone. As a consequence, the overlying stratiform pyritic orebody shows variable Zn but generally low Cu contents. Insufficient isolation of the hydrothermal upflow zones through the more permeable upper 500-600 (?) metres probably led to extensive mixing of ambient sea-water to the hot solutions. In many cases this caused more or less total sulphide precipitation (in the form of veins and disseminations) at deep levels below the contemporaneous seafloor within the ophiolite fragments of the western Trondheim district.

The mineralogical and geochemical variations described in this report, in volcanites and their alteration products as well as in sulphide mineralizations related to hydrothermal feeder systems, can be an important tool in the prospecting for proximal massive sulphides. In particular these relationships may be of great value within stratigraphically inverted sequences, such as at Løkken.

SAMMENDRAG

Massive, stratiforme sulfidmalmer innen ofiolittsekvensene i Løkkenområdet er utfelt på havbunnen direkte over dype spalteformige hydrotermale tilførselskanaler. Disse representerer oppstrømsdelene av store konveksjonssystem av sirkulerende sjøvann, drevet av store temperaturgradienter i den tynne havbunnsskorpen. Visse omvandlingsformer som f.eks. anrikning/tap av K_2O , tap av Cu og oksydasjon av basaltene reflekterer fremdeles de varierende fysiske og kjemiske betingelser sjøvannet har gjennomgått i nedstrømsdelene av disse systemene. I tilførselskanalene har de hurtig oppstigende varme løsningene reagert med basaltene og dannet kloritt-albitt-bergarter med videre overgang mot kloritt-kvartsbergarter ved fremskridende omvandling spesielt i sentrale deler. Det er sammenheng mellom graden av omvandling, og intensitet eller varighet av den hydrotermale aktiviteten. Geokjemisk er bergartene i tilførselssonen (i nedre deler) karakterisert av sterkt tap av CaO (og Sr), mens Na_2O er anrikt perifert og er forsvunnet i sentrale deler. Totaljern er generelt anrikt; tap av Fe er koblet til lokal anrikning av MgO i perifere høyere deler og tolkes som produkt av innblanding av normalt sjøvann i disse deler. Generelle geokjemiske trekk forøvrig er tap av SiO_2 og K_2O i nedre deler og anrikning av de samme aller øverst i tilførselssonen, hvor kvarts-sericittomvandling med overgang mot mer perifer albittomvandling finnes både ved Løkken og Høydal.

Variasjoner i sulfidmineralisering (både disseminasjoner og årer), innen de enkelte tilførselssoner og mellom de ulike forekomster, forklares med forskjeller i fysiokjemiske betingelser, som temperatur og varierende innblanding av normalt sjøvann.

Ved Løkken har forholdene vært slik at bare ubetydelig med sulfider ble utfelt i den helt sentrale del av sonen, hvor de hydrotermale løsningene kunne nå havbunnen relativt uforstyrret. Laterale og vertikale (temperatur ?) - gradienter har så gitt suksessiv utfelling av Cu (og Ag), Co, Pb (og Au) sammen med pyritt mot de ytre deler av tilførselssonen, mens Zn er utfelt først i de mest perifere deler og tildels utenfor hvor løsningene har kunnet blandes med normalt sjøvann. Mangan (i silikater ?) følger Zn, men viser en enda videre dispersjonshalo. I de øverste deler av sonen øker utfellingen av sulfider (inkludert pyritt); kobberkis i størst grad, sinkblende i minst grad slik at mineraliseringen i årene her er karakterisert av et høyt Cu/Zn forhold. Samtidig anrikning av B i omvandlingsbergartene her (samt i ytre nedre deler) antyder innblanding av kaldt sjøvann som en viktig fellingsmekanisme. Generelt er imidlertid sulfidmineraliseringene i

tilførselssonen lav i både Zn, Cd, Ni, Pb, Au, Co og Cu i forhold til massivmalmen.

Ved Høydalsforekomsten er løseligheten for de fleste elementer i mye større grad overskredet allerede nede i tilførselssonen (kanskje som følge av større innblanding av sjøvann). Det meste av kobberet var derfor tapt for løsningene nådde sjøbunnen, og også Zn og Mn er i stor utstrekning utfelt og anriket i tilførselssonen. Resultatet er en stratiform pyrittmalm med varierende Zn men gjennomgående lavt Cu-innhold. Manglende 'isolasjon' av de hydrotermale tilførselssonene gjennom de mer permeable, øvre 500-600 (?) meter, har i Løkkenområdet ofte gitt nær total sulfidutfelling (som disseminasjoner og årer) på dype nivå, som resultat av mer utstrakt innblanding av normalt havvann til det hydrotermale systemet.

Mineralogiske og geokjemiske variasjoner i vulkanitter og deres omvandlingsprodukter, såvel som i sulfidmineraliseringer i tilknytning til hydrotermale tilførselssoner, kan være et betydningsfullt verktøy ved prospektering etter proksimale massive sulfider, særlig innen områder hvor stratigrafien er invertert.

INNLEDNING

Sommeren 1982 ble det utført boringer i området umiddelbart nord for Løkkenmalmen med ett siktemål: å oppnå en bedre forståelse av form, omvandlingsmønster og mineralisering i Løkkenmalmens hydrotermale tilførselssone. En ville også prøve å finne mer utstrakte, primære dispersionshaler knyttet til den hydrotermale aktiviteten. Utgangspunktet for undersøkelsen var at en økt kjennskap til sulfidmalmenes tilførselssone kan utnyttes aktivt ved prospektering etter slike malmer. Tidligere hadde undertegnede, i forbindelse med et NAVF-stipend, gjort detaljundersøkelser ved Høydal grube (2 km øst for Løkken), som klart viste at massivmalmen (i Nye Høydal) var en helt proximal avsetning: sulfidene var utfelt på havbunnen umiddelbart over dype, spalteformige tilførselssoner for hydrotermale, metall- og svovelholdige malmdannende løsninger. Geokjemiske undersøkelser ble her gjort på prøver fra gamle borhull og fra dagen, og ga et visst mønster for sidestensomvandling og geokjemisk dispersjon (dette vil forøvrig bli sammenlignet med situasjonen ved Løkkenmalmen). På grunnlag av det en visste om form og orientering av Høydalsmalmens tilførselssone, samt endel forundersøkelser av den såkalte 'breksjemalmen' som var kjent umiddelbart under (stratigrafisk) Løkkenmalmen og som var svært lik de øverste deler av Høydal tilførselssone, kunne en så plassere to borhull som var ment å skjære tilførselssonen på dypere nivå enn hva som var tilgjengelig i gruva. I tillegg ble det utført prøvetaking og undersøkelser i 'breksjemalm' - området omkring Gammelsjakta ved øst-enden av Løkkenmalmen.

PRØVETAKING OG ANALYSETEKNIKK

De to borhullenes plassering er vist på bilag 2. Borhull 1 ble boret til 235 m, med retning 180° (mot syd) og 70° fall. Borhull 2 var 461 m og var rettet inn mot Bh. 1, dvs. 153° med 80° fall. Generelt ble borkjernene prøvetatt systematisk hver 10. meter, unntatt i de svært homogene øvre deler av B.h.2 hvor det er prøvetatt hver 20. meter. Hver av disse prøvene er 10-20 cm lange kjernebiter av grønnstein eller omvandlingsbergarter. Mindre avvikelser fra regelen om prøve hver 10. meter kan være gjort for å unngå sulfidårer, hyaloklastitter, puterandsoner etc.; mest mulig rene bergartsprøver, fra det indre av lavaputer eller fra massive grønnsteiner ble etterstrebet. I tillegg ble bergartsprøver

samlet i gruva omkring Gammelsjakta, og noen prøver ble også tatt i dagen i et profil øst for Vedmyrtoppen. Tilsammen 92 bergartsprøver ble samlet for analyse. I tillegg ble 39 prøver av sulfidårer samlet fra de mineraliserte deler av borthullene samt fra Gammelsjaktområdet i gruva.

Prøvene ble analysert av Bondar-Clegg & Co. Ltd., Ottawa, Canada. De 92 bergartsprøvene ble analysert på SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (totaljern), MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 og S ved en semikvantitativ røntgenfluorescens bestemmelse. Sr, Rb, Cr, V, Zr, Ba og Y ble analysert ved atomabsorpsjon etter totaloppslutning med en kombinasjon av flere syrer inkludert HF. Hg er analysert etter oppslutning med HNO_3 - H_2SO_4 -HCl- KMnO_4 , og B ved DC-plasma etter smelteoppslutning med NaOH. Cl ble forsøksvis analysert på hver 10. prøve, men ble ikke fulgt opp fordi verdiene her lå under deteksjonsgrensen på 200 ppm. De 39 prøvene av sulfidårer ble analysert på Cu, Pb, Zn, Mn, Ni, Cr, Co, Ag og Cd ved AAS etter oppslutning med HNO_3 -HCl. For gullanalyse ble benyttet oppslutning i 'kongevann' etterfulgt av en kombinert 'fire assay' - AAS analysemetode, og svovel ble bestemt ved XRF. Analysetallene finnes i bilag 3.

GEOLOGI

Løkkenfeltets ofiolittsekvens består av - i hovedtrekk - i de stratigrafisk nedre deler et kompleks av store gabbrokropper som oppover glir over i et kompleks av subparallelle basiske ganger og 'sills'. Dette 'sheeted dyke' kompleks er omkring Løkken i stor grad 'spist opp' av høy-nivå gabbrointrusjoner.

Gangkomplekset glir igjen over i en 1-2 km tykk submarin lavasekvens, der de nedre deler består av en monoton serie av putelavaer med betydelige mengder hyaloklastitt (vulkansk glass-materiale), av en noe fraksjonert 'ocean floor tholeiite' basaltisk sammensetning. De øvre deler av lavasekvensen utgjøres av tykke tettpakkede putelavaer og massive basalter av en noe mer primitiv OFT sammensetning, vekslende med mellomlagrede vasskis (sulfid/oksyd/silikat jernformasjoner) og jaspishorisonter, samt tykke grønnsteinsbreksjer tolket som talusavsetninger. Helt underordnet finnes kvartskerotofyrer (dels kvarts - feltspat porfyrisk) innenfor den øvre del av lavaserien, og representerer sure vulkanitter som magmatisk er assosiert med små kropper av plagiogranitter (Na-granitter) i gabbrokomplekset.

I det undersøkte området er sekvensen invertert med moderat fall mot NNV, lagningen stryker ca. ØSØ-VNV. Deformasjonen er generelt meget svak: primære

strukturer som f.eks. lavaputer finnes tilsynelatende udeformert. Folding i større skala kan ikke påvises. Mindre folder finnes imidlertid i malmen, og tette til nært isoklinale folder av større målestokk kan finnes lenger nord i Løkkenfeltet og kanskje også mot vest i Løkken gruve (Astrupområdet). En skifrihet er stedvis utviklet ved kontakten mellom ulike lithologiske enheter, spesielt ved store kompetanseforskjeller, og denne har en mer ØNØ-VSV strøkretning og et NNV fall som er mindre enn for lagdelingen. Umiddelbart vest for det undersøkte området opptrer en N-S orientert skjærsone og leirsleppe som videre vestover (mot dypet) nærmer seg Løkkenmalmen; over denne sonen ligger grønnsteiner og gabbro tektonisk plassert i sin nåværende posisjon. Sonen berører imidlertid ikke det området som er boret og prøvetatt i denne undersøkelsen. En større forkastning (eller sone av forkastninger) strekker seg trolig i Ø-V retning i søkket mellom Vedmyrtoppen i nord og Berguggelåsen i syd. En vertikalbevegelse på i størrelsesorden 100 meter kan anslåes, der sydsiden er blitt forkastet ned. Heller ikke denne bevegelsen affekterer imidlertid direkte det oppborede/prøvetatte området. Bergartene har forøvrig gjennomgått en regional, lav til midtre grønnskiferfacies metamorfase som har overpreget både den primære magmatiske mineralogi og den hydrotermale omvandlingsmineralogi. Rester av klinopyroksen kan finnes lokalt, ellers sees bare pseudomorfoser etter den vulkanske mineralogi og tekstur. Hydrotermalt dannede mineraler vil sannsynligvis ikke være påvirket av regionalmetamorfasen i så stor grad, i og med de noenlunde sammenfallende temperaturområder for lav grønnskiferfacies og det en vil vente under hydrotermale forhold. Løkkenmalmen ligger stratigrafisk i de midtre deler av lavaserien, litt høyere enn overgangen mellom 'nedre putelava' og den øvre lavaserie, og den hydrotermale tilførselssone skjærer følgelig begge basalttypene. Umiddelbart stratigrafisk under malmnivået omkring østenden av malmen opptrer også lokalt de tidligere omtalte sure effusiver; under vasskisen i Berguggelåsen, i gruva og i borhull 1, og disse bergartene vil da også kunne være påvirket av hydrotermalomvandlingen (se bilag 4 og 5). Den stratiforme massivmalmen her ved østenden av Løkkenforekomsten er relativt liten i tverrsnitt: størrelsesorden $100 \times 10 \text{ m}^2$, men øker i mektighet vestover. Hovedmalmen ser ut til å være svakt foldet og mer og mindre oppdelt i en øvre og nedre del, som imidlertid begge er invertert. Strukturelt litt over hovedmalmen opptrer en tynn plateformet malm - 'Bakindien' (bilag 5). Lavastrukturer i hengkontakten her viser at også denne er invertert. En tredje malmkropp - 'Indien' - opptrer mellom Bakindien og hovedmalmen lenger mot vest. Få data finnes om massivmalmene i disse gamle driftsområdene. De er heller ikke studert inngående nå, men det ser ut som hovedmalmen og Indien i hovedsak er kompakt, finkornig, relativt homogen og strukturløs med lokale partier av resedimenterte sulfid-jaspis-breksjer.

Bakindien er en blanding av fint laminerte, mulig resedimenterte sulfider med tynne magnetitt-kloritt-lag, og grovere sedimentære sulfid (-grønnsteins)-breksjer. Det ser ikke ut som sammensetningen på malmene her har avveket særlig fra det en finner lenger vest i Løkkenforekomsten. Jaspislag finnes i kontakt med massivmalmene og kan opptre både i heng og ligg. Vasskis opptrer stratigrafisk over hovedmalmen, men kan være skilt fra massivmalmen med noen meter av grønnstein. Jaspis fortsetter lateralt ut fra malmen og danner, sammen med 'vasskis', horisonter av 15-30 meters mektighet som definerer malmnivået godt også i borhullene (bilag 5). I borhull 2, nokså nært utkilingen av massivmalmen, finnes på dette nivået også en sedimentær båndet talk-kalsitt-bergart.

Løkkengrønnsteinene er gjennomført av flere typer av intrusiver som er yngre enn ofiolittsekvensen, og med en vesentlig forskjellig magmatisk sammensetning, bl.a. tonalittiske feltspat-(kvarts)-porfyritter og basaltiske til andesittiske, ofte porfyriske ganger av kalk-alkalin kjemi. I det undersøkte området opptrer relativt hyppig basaltiske diabasganger av sistnevnte type, varierende fra metertykke dykes til intrusjoner av mer enn 100 m tykkelse. En slik kan følges fra nord-siden av vegen ved Vedmyrtoppen og mot ØNØ forbi 'Folkets Hus', og finnes også i de øvre deler av borhull 2 (bilag 5). Prøvetaking av slike 'fremmede' bergarter skaper naturligvis geokjemiske anomalier som ikke har noen tilknytning til hydrotermal omvandling, men kun reflekterer disse intrusjonenes spesielle primære kjemiske sammensetning.

HYDROTHERMAL OMVANDLING

Mineralogi

Normal mineralogi i grønnsteinene i området er: albitt - epidot - aktinolitt - ⁺kloritt + kalsitt - leucoxen (eller titanitt) pluss aksessoriske mineral. I de sure vulkanittene er hovedmineralene albitt - kvarts - sericitt sammen med mindre mengder leucoxen. En spesiell form for omvandling finnes lokalt i borhullene stratigrafisk over malmnivået, og også regionalt i Løkkenområdet innenfor større partier av midtre til øvre del av lavasekvensen: en varierende oksydering av basaltene, noen ganger til helt rødbrune, hematittrike 'grønnsteiner', eller 'rødfjell' i lokal terminologi. Oksyderingen følges av og til av et betydelig kalsittinnhold og kalsittfylling av alle sprekker og hulrom. Denne omvandlingen

har imidlertid ingen direkte relasjon til de hydrotermale tilførselssonene til sulfidmalmene.

I de perifere dypere deler av tilførselssonen ved Løkken, og mer lokalt utenfor selve sonen, viser metabasaltene en overgang mot en kloritt-albittdominert mineralogi. Lokalt i disse ytre deler av omvandlingssonene kan kloritt-albittrike metabasalter få et betydelig innhold av magnetitt. Magnetittholdige, sulfidfrie, moderat omvandlete grønnsteiner finnes bl.a. i borhull 1, relativt høyt opp i omvandlingssonen (bilag 4). I samme posisjon i forhold til tilførselskanalen men 200 m dypere ned (lenger fra massivmalmen), i borhull 2, er tilsvarende kloritt-albittbergarter ikke lenger mangetittholdige, men har istedet en del sulfiddisseminasjon. Det kan her nevnes at de øvre deler av tilførselssonen lenger vest i Løkkenmalmen (spesielt i Wallenbergområdet), i store partier er meget rik på mangetitt. Magnetitten opptrer her iallfall delvis i sterkt omvandlede kloritt-kvartsbergarter (se nedenfor), men detaljerte undersøkelser er ikke gjort i dette området og mangetittens forhold til de øvrige deler av tilførselssonen og sulfidmineraliseringene er ikke kjent.

Høyere oppe ser disse perifere omvandlingsproduktene ut til å bli mer albittrike, og ganske rene albitt-leuoxen-bergarter kan finnes stedvis. Innenfor selve tilførselssonen, som er 70-80 meter vid, forsvinner albitten hurtig og en går over i kloritt-kvarts-leuoxen-bergarter med varierende sulfiddisseminasjon. Mot dypet blir denne bergarten stadig mer klorittrik på bekostning av kvarts som nesten forsvinner, samtidig som kloritten blir mer jernrik og sterkere grønn. Primært vulkanske teksturer og strukturer som hyaloklastitter og puterandsoner kan være godt bevart selv i de nesten rene klorittbergartene, likeledes viser kvarts og/eller leuoxen ofte pseudomorfoser etter albittlistr i en pseudo-ofittisk tekstur.

I de øverste ca. 20-40 m av tilførselssonen ser det ut som kloritt-kvarts-bergarter spesielt i de noe perifere deler er karakterisert av en mer magnesiumrik, lys kloritt. Videre blir klorittinnholdet hurtig lavere, mens sericitt blir meget vanlig, og sentralt i øverste del av tilførselssonen er både sure vulkanitter og basalter omvandet til nesten rene kvarts-sericitt (-leuoxen)-bergarter, med tildels betydelig sulfiddisseminasjon.

Geokjemi

Tidligere undersøkelser har vist at de minst omvandlete grunnsteinene i Løkkenområdet har meget store likhetstrekk med tholeiittiske basalter dannet på oceaniske spredningsakser, men med visse stratigrafiske variasjoner (se foran). Gjennomsnittlig sammensetning for havbunnstholeiitt er vist sammen med gjennomsnittlig 'normal' Løkken-grunnstein i bilag 6 for sammenligning. Det må imidlertid bemerkes at analysene i herværende undersøkelse tildels er semikvantitative, og for enkelte elementer kan det være endel systematiske avvik. Spesielt gjelder dette barium som gjennomgående er betydelig høyere enn ventet ut fra tidligere undersøkelser, og Ba er neglisjert i det følgende. MgO er også relativt høyt, men her ser i alle fall variasjonene i magnesium ut til å gi et reelt bilde, selv om ikke absoluttverdiene er korrekte. Sammenligning med tidligere, mer nøyaktige analyser antyder også enten at TiO_2 er systematisk for høyt eller Zr noe for lavt, i denne undersøkelsen. De geokjemiske variasjoner i gammelsjaktområdet i gruva og i borhull 1 og 2 er fremstilt i diagram i bilag 7 til 9.

CaO og Na_2O (bilag 7a, 8a, 9a)

I stor grad reflekterer kjemien de mineralogiske variasjoner i omvandlingssonen. For eksempel viser CaO meget lave verdier gjennom hele tilførselsskanalen, spesielt i kloritt-kvartsbergartene og kvarts-sericittbergartene, men også i de perifere kloritt-albittdominerte metabasaltene. Sterk og tildels fullstendig utlutning av kalsium kan finnes over en 110-130 m vid sone, men graden av CaO-tap ser ut til å avta noe mot dypet i tilførselssonen, eller i en viss del av sonen. Også utenfor denne sonen finnes hyppig mere moderat omvandlete basalter som ofte har mistet mer enn halvparten av sitt opprinnelige CaO. Ved moderat omvandling, perifert og utenfor selve tilførselsskanalen, viser CaO en negativ korrelasjon med Na_2O , slik at Na_2O anrikes noe på bekostning av CaO i kloritt-albittbergartene. Ved videre omvandling til kloritt-kvarts eller kvarts-sericittbergarter forsvinner imidlertid også natrium, også her med mulig avtakende Na_2O -tap nedover i tilførselssonen. Sonen med sterk Na_2O -utlutning er noe smalere enn for CaO: 80 - 90 meter vid.

Fe_2O_3 (totaljern) og MgO . (bilag 7a, 8a, 9a)

Totaljern (uttrykt som Fe_2O_3) og MgO viser mye mindre bakgrunnsvariasjon (utenfor selve tilførselskanalen) enn Na_2O og CaO . I en 70 - 80 meter vid sone i tilførselskanalen viser imidlertid totaljern en meget markert anrikning som ser ut til å avta gradvis oppover fra mer enn 30 % (som Fe_2O_3) i dype sentrale deler til vel 20 % i kloritt-kvartsbergarter i de øvre deler. Sentralt-øverst ligger jerninnholdet på omkring 10-12 % (Fe_2O_3) både i silisifiserte basalter og sure vulkanitter. Totaljern viser øyensynlig ingen korrelasjon med sulfidinnholdet; innenfor de ulike deler av tilførselssonen ser det ut som et visst totaljerninnhold balanseres mellom silikat - (kloritt-)bundet jern og sulfidbundet jern nærmest uavhengig av sulfidinnholdet. Innenfor tilførselskanalen viser MgO bare helt ubetydelig (kanskje insignifikant) høyere verdier der jern er sterkt anrikt. I overgangssonen mellom kloritt-kvartsbergartene og de mer perifere albitt-klorittbergartene er det imidlertid en viss anrikning av MgO koblet til lokalt noe lavere jernverdier. Mot dypet blir disse trekk bare vage, mens de høyere oppe (B.h.1-bilag 8a) er nokså markert og i de perifere aller øverste deler av tilførselssonen opptrer meget magnesiumrike kloritt-kvartsomvandlete basalter (bilag 7a). Sentralt-øverst synker så MgO -innholdet drastisk i kvarts-sericitt-bergartene, i både omvandlete sure og basaltiske vulkanitter. Selv om jern og magnesium primært i vulkanitter er nokså avhengig av magmaets fraksjoneringsgrad, er det i dette tilfellet lite som tyder på at de ovenfornevnte trender reflekterer primære magmatiske variasjoner (dette basert bl.a. på innhold av mer stabile elementer som TiO_2 , Zr og Cr som i enda større grad er avhengig av fraksjoneringsgraden).

K_2O (bilag 7a, 8a, 9a)

Generelt er kalium sterkt anrikt i de aller øverste deler av tilførselssonen, der sericitt er et viktig mineral. Både i omvandlete basalter og sure vulkanitter ligger K_2O -innholdet her på mellom 1 og 2 % (maksimalt 3,3 %) i kvarts-sericittbergarter og overgangstyper som sericittholdige kloritt-kvarts omvamlingsprodukter (bilag 7a). I borhull 1, i kloritt-kvartsbergarter som befinner seg 60-100 m fra massivmalmen, har K_2O -nivået falt til 0,5 - 1 %, bortsett fra i de mest sentrale 20-30 m tilførselskanalen hvor kalium er blitt betydelig lavere (bilag 8a). Omkring 300 m under malmnivået, i borhull 2, har K_2O avtatt enda mer og når maksimalverdier på bare ca. 0,5 %. En slik liten anrikning av kalium finnes lokalt både perifert og mer sentralt i tilførselskanalen her (bilag 9a). Forøvrig ser K_2O ut til å være 'utlutet' fra basaltene omkring tilførselssonen og i stor grad også fra de sentrale dype deler av sonen.

SiO₂ (bilag 7a, 8a, 9a)

I hovedtrekk er det et markert tap av SiO₂ i de dypere deler av tilførselssonen, som gradvis går over til en viss anrikning i de øvre deler. I de øverste sentrale deler ligger riktignok omvandlete sure vulkanitter på mellom 64 og 72 % SiO₂ og noen av disse har dermed tilsynelatende tapt noe SiO₂ under omvandlingen. En kvarts-sericittomvandlet basalt (prøve LØ6 - se tabell, bilag 3) viser imidlertid markert anrikning av SiO₂ (til vel 57 %). De kloritt-kvartsomvandlete basaltene varierer mellom 54 og 30 % SiO₂, med de laveste verdiene i mer rene kloritt-varianter dypt nede i tilførselssonen. I tillegg til denne generelle trenden med økende SiO₂ oppover, er det en markert variasjon også i et paleohorizontalsnitt gjennom kloritt-kvartsdelen av tilførselskanalen. Dette er spesielt synlig i borhull 1, der den nåværende 'øvre' del av sonen ('øverst' i borhullene) er betydelig høyere i SiO₂ enn 'nedre' del (se bilag 8a). I begge borhull faller disse høyere SiO₂ verdier sammen med noe lavere jernanrikning og noe mindre 'utlutning' av bl.a. Na₂O og CaO. En viss anrikning av SiO₂ kan finnes også i de mer perifere albitt-klorittbergartene langs ytterkanten av selve tilførselskanalen.

Al₂O₃ (bilag 7a, 8a, 9a)

I borhull 1 og 2 er det ingen betydelig endring av aluminiuminnholdet i metabasaltene utover bakgrunnsvariasjonen i grunnsteinene. Bare i de aller øverste sentrale deler av tilførselssonen kan det finnes en signifikant forandring, med en viss reduksjon av Al₂O₃ både i omvandlede basalter og i sure vulkanitter. I metabasaltene kan Al₂O₃ være redusert til 8-12 % fra normale bakgrunnsverdier på 13-17 %, mens de sure vulkanittene som har forventede normale Al₂O₃-verdier på 11-13 % ofte er redusert til 7-9 % Al₂O₃.

TiO₂, P₂O₅, Zr, Y og V (bilag 7b, 8b, 9b)

Disse er elementer som alle er karakterisert av et relativt høyt ionepotensial, dvs. forhold mellom ioneladning og ioneradius (såkalte 'high field strength' elementer). Generelt er disse tungt løselige og kan dermed antas å være nokså stabile under omvandling. Samtidig viser disse elementene visse likhetstrekk ved primært magmatiske prosesser. De vil alle anrikes i omtrent samme grad ved magmatisk differensiasjon i basaltiske system, mens i sure magma vil f.eks. Zr og Y kunne

anrikes betydelig samtidig som TiO_2 , P_2O_5 og V blir sterkt redusert (kfr. analysene av basiske og sure vulkanitter i Løkkenfeltet - bilag 6).

Det er hovedsakelig på grunnlag av disse variasjoner at endel av omvandlingsbergartene øverst i tilførselssonen har kunnet bli klassifisert som opprinnelig sure vulkanitter: de har et karakteristisk lavt innhold av TiO_2 , P_2O_5 og V og er samtidig sterkt anrikt på Zr og Y.

I likhet med aluminium som også er ganske stabilt, er det ingen av disse bestanddelene som viser signifikante anomalier i tilførselssonen, i borhull 1 og 2 (bilag 8b og 9b). I borhull 2 er det en svak antydning til noe lavere verdier inne i tilførselskanalen, men i betraktning av at analysene er semikvantitative og at bergartene her har en meget spesiell hovedelementsammensetning som kan tenkes å gi analytiske avvik, er det høyst usikkert om disse er signifikante anomalier. Av samme grunn er det uklart om de sterkt varierende Ti/Zr og Y/Zr forhold i tilførselssonen (se bilag 7d, 8d, 9d) er reelle eller skyldes analyseunøyaktighet i disse bergartene (ideelt skulle disse forholdstallene være nokså konstante så lenge en har å gjøre med en serie metabasalter). Aller øverst i tilførselssonen ser det likevel ut til å være et signifikant tap av i alle fall TiO_2 og tildels P_2O_5 og V (noe mer usikkert for Zr og Y) i de mest ekstremt silisifiserte og sulfidiserte vulkanittene, både de sure og basaltiske (bilag 7b).

MnO (bilag 7b, 8b, 9b)

Mangan viser lave verdier i de øverste sentrale deler av tilførselssonen (bilag 7b) og er trolig 'utlutet' i større og mindre grad fra de mest ekstremt omvandlete vulkanitter her, særlig klorittfattige varianter. Dypere nede er MnO-innholdet normalt eller bare svakt forhøyet i selve tilførselskanalen. I de ytre deler av sonen spesielt utover fra overgangssonen mellom kloritt-kvartsomvandling og kloritt-albittomvandling øker imidlertid mangan sterkt, ofte til verdier omkring det dobbelte av det normale for metabasaltene (bilag 8b, 9b). Mangan-anrikning kan finnes langt ut fra tilførselssonen, også i metabasalter som ellers ikke viser særlige tegn på mineralogisk eller kjemisk omvandling eller mineralisering. Ut fra de foreliggende data ser det ut som denne mangan-haloen er bredere mot dypet, og i borhull 2 (ca. 300 meter under malmnivået) er det signifikant anrikning av MnO i grønnsteinene i alle fall i 60-70 meter ut fra selve tilførselskanalen.

Sr (bilag 7b, 8b, 9b)

Strontium har et fordelingsmønster som er svært likt det for CaO, noe som reflekterer den kjemiske likhet mellom de to elementer og dermed deres relativt like opptreden i forhold til ulike mineraler. Likevel finnes visse forskjeller i opptreden: i de aller øverste deler av tilførselssonen (se bilag 7b), i de kvarts-sericitttdominerte omvandlingsbergartene der CaO-innholdet er nært null over det hele, er det en sentral anrikning av Sr i forhold til tilførselssonen forøvrig. Sammenlignet med 'normale' Sr-verdier er det imidlertid også her et tap av Sr i bergarten ved omvandlingen.

Svovel (bilag 7c, 8c, 9c)

Svovelinholdet i tilførselssonen, i form av disseminerte sulfider - hovedsaklig pyritt - (sulfidårer er unngått) viser en systematisk, markert økning oppover i sonen. Fra maksimalverdier på omkring 1,5 % S i borhull 2 (300 m fra massivmalmen) øker innholdet av svovel til mellom 1 og 4 % i borhull 1 (ca. 100 m fra massivmalmen) og videre til 4-13 % S i de øverste sentrale deler av tilførselssonen. Videre er det helt øverst en tendens til å finne den høyeste sulfiddisseminasjonen i de sentrale, sterkest omvandlete bergartene. Dypere ned i tilførselskanalen derimot, er det ofte en anrikning av disseminerte sulfider langs de ytre deler av den sterkest omvandlete (kloritt-kvarts) sonen, mens de helt sentrale deler dypt i tilførselssonen kan være nesten fri for sulfiddisseminasjon (se bilag 8c og 9c). Det er ellers verdt å legge merke til at S-anomalier - omtrent like store som de i nedre del av tilførselssonen - finnes også i relativt normale grønnsteiner langt utenfor hovedsonen for den hydrotermale aktiviteten.

Cu, Zn, Pb (bilag 7c, 8c, 9c)

Kobber, hovedsaklig som kobberkis (disseminert), er generelt anrikt omkring den midtre del av tilførselssonen, men med en mulig helt sentral sone på 10 - 30 m med meget lave verdier (tildels tap) av både Cu og Zn. De enkelte sonene med kobber-anrikning er i de nedre deler av tilførselsskanalen ganske smale, - størrelsesorden 10-20 m. I de aller øverste deler blir det imidlertid en sterk anrikning av kobber gjennom hele den sentrale del av tilførselssonen, og her er anrikningen mest markert i de mest sentrale, mest intenst omvandlede bergarter hvor

Ni og Cr (bilag 7c, 8c, 9c)

Både nikkel og krom viser store variasjoner i grønnsteinene utenfor tilførselssonen, i borhull 1 og 2 (se bilag 8c, 9c). Det er her en klar sammenheng med graden av spilittisering - eller $\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ forholdet, med tilsynelatende tap av både Ni og Cr i de sterkest spilittiserte grønnsteinene. Dette er i overensstemmelse med observasjoner fra tidligere analyser fra Løkkenområdet, spesielt i de stratigrafisk dypere grønnsteiner, selv om Cr er et element som generelt regnes for å være relativt stabilt ved omvandling. Blant lite omvandlete grønnsteiner i området er imidlertid både Cr og Ni forholdsvis stabile: gjennomsnittlig Cr-innhold er 225 og 380 ppm i henholdsvis nedre og øvre del av lavaserien (standardavvik 85 og 126 ppm), mens Ni ligger på henholdsvis 60 og 140 ppm (standardavvik 17 og 48 ppm) (bilag 6). Magmatiske prosesser kan tenkes å gi store variasjoner i primært innhold av begge disse elementene i basaltene, og det er ikke lett å angi eksakt tapet (eventuelt anrikning) av Cr og Ni i omvandlingsbergartene uten å ha en 'uomvandlet' sikker ekvivalent til hver av de omvandlete lavaprøvene. Det som imidlertid synes klart, ved siden av lave verdier assosiert med 'splittiske' albitt-klorittdominerte bergarter utenfor tilførselssonen, er at den mest sentrale del av sonen er relativt lav i Cr og Ni og denne sonen er igjen omgitt på begge sider av høye Cr-verdier som går helt ut til de perifere deler (bilag 8c, 9c). Denne trenden følges bare delvis av Ni, idet Ni/Cr-forholdet (bilag 8d og 9d) er mye lavere i den mest 'utviklede' del av tilførselssonen (den del som nå ligger dypest under dagoverflaten), der bl.a. jernanrikningen er størst og SiO_2 -tapet mest markert (kfr. bilag 8a og 9a).

Hg (bilag 7c, 8c, 9c)

Kvikksølv er bare helt lokalt anrikt i nedre del av tilførselssonen og viser heller ingen klare 'haloer' utenfor selve sonen. Bare i de aller øverste deler av tilførselskanalen er Hg gjennomgående litt anrikt. Verdiene svinger her mellom 35 og 250 ppb Hg, med en mulig svak korrelasjon med sink.

B (bilag 7d, 8d, 9d)

Bor-analyser på grønnsteiner i Løkkenområdet har gitt bakgrunnsverdier på stort sett mellom 10 og 35 ppm B. I forhold til dette er det ingen betydelige B-anomalier i eller omkring de dypere deler av tilførselssonen ved Løkken

(B.h.2). En viss økning til verdier mellom 40 og 60 ppm sees i de ytre deler av tilførselskanalen, 100 m under malmnivå, i borhull 1 (bilag 8d). I de aller øverste sentrale deler øker bor-innholdet videre til 50-70 ppm, og både her og i borhull 1 er det en antydning til korrelasjon med K_2O , samt med innholdet av disseminerte sulfider.

'STOCKWORK' MINERALISERING

Mineralogi

Ved siden av disseminasjoner danner sulfidene et nettverk av årer i tilførselssonen. Generelt øker åretettheten og åretykkelsen oppover. I de aller øverste deler, hvor mineraliseringen har vært drevet som 'breksjemalm', kan en finne meget tette årenettverk med tildels tykke (inntil $\frac{1}{2}$ - 1 m) årer med utallige tynne forgreninger. I intervallet 50 - 100 m under malmnivået avtar mineraliseringsgraden meget raskt og i de dypere deler av tilførselskanalen dominerer sulfidårer av 1-10 cm tykkelse selv om tykkere årer finnes også her. Sulfidene i årene er middelskornige til grovkornige, og altså betydelig grovere enn i den meget finkornige, stratiforme massivmalmen. Kvarts er dominerende gangartsmineral i årene i de øverste, sterkt mineraliserte deler av tilførselssonen, men kvartsinnholdet avtar mot dypet. Forøvrig opptrer kalsitt og jernrik kloritt sammen sulfidene. Som for disseminasjonene er pyritt, kobberkis og sinkblende de eneste sulfidmineraler identifisert i årene (fahlerts er funnet lokalt). I stor grad opptrer kobberkis og sinkblende som meget små, tette inneslutninger i grovere pyritt, men også som matrix mellom pyrittkrystaller.

Kjemi

Et åpenbart problem ved tolkningen av analysedata for sulfidårene, er at prøvetettheten har vært for liten til å gi et entydig bilde av elementfordelingene. Dette er et større problem her enn for bergartsanalysene (med sulfiddisseminasjon), p.g.a. at fordelingsmønsteret for de fleste elementene er betydelig mer uregelmessig i sulfidårene. Likevel er det mulig å få et visst inntrykk av en systematikk i fordelingen av mange elementer. For eksempel for Cu, Zn, Co og tildels Mn er fordelingsmønsteret meget likt det for bergartsprøvene; de to mønstrene kan også delvis utfylle hverandre. Fordelingsmønstrene er vist i bilag 10,11 og 12.

Cu

Kobber er meget lav i et helt sentralt parti i dypere deler av tilførselssonen. Cu-verdier på 100-200 ppm her skifter så hurtig til verdier opp til > 2 % i de mer ytre deler (bilag 11a og 12a). Innen den helt sentrale del av tilførselskanalen, øker Cu meget raskt til mellom 0,2 og > 2 % i de aller øverste deler, og i de øverste ytre deler av sonen er kobberinnholdet jevnt over 2 % (bilag 10a). Utenfor den ytre sonen med Cu-anrikning blir sulfidårene ofte lavere i Cu igjen, både i dypere og øvre deler av tilførselssonen. Til sammenligning er kobberinnholdet i Løkkenmalmen (stratiform massivmalm) gjennomsnittlig omkring 2 %.

Ag

Gjennom hele tilførselskanalen viser sølv en god korrelasjon med kobber, med Ag/Cu-forhold stort sett mellom 0.3×10^{-3} og 10^{-3} . I nedre sentrale deler er sølvinnholdet således meget lavt, 0.2 til <0.1 ppm, økende til mellom 5 og 15 ppm i mer ytre deler med Cu-anrikning (bilag 11a og 12a). Øverst øker Ag fra 3-12 ppm i sentrale deler til 7-40 ppm lenger ut (bilag 10a). Gjennomsnittlig sølvinnhold i Løkken massivmalm er ca. 22 ppm.

Co

Som for bergartsprøvene, ser kobolt ut til å være anriktet i en sone såvidt utenfor kobberanrikningen. På samme måte som for Cu er dette imidlertid mest markert i de dypere deler av tilførselssonen, hvor Co øker fra i størrelsesorden 50 ppm i sentrale deler til omkring 200 ppm lenger ut (bilag 12b). I øvre deler øker Co fra omkring 200 ppm sentralt til verdier som lokalt når opp mot 600 ppm i en ytre sone (bilag 10b og 11b). Tilførselskanalen er dermed generelt lav i kobolt sammenlignet med Løkken massivmalm, som har årsgjennomsnitt varierende mellom 500 og 800 ppm Co.

Zn

Sink viser svært lave verdier gjennom nesten hele tilførselssonen i dens nedre deler: 20-50 ppm Zn er vanlig. Først i helt perifere sulfidårer, i overgangssonen mellom kloritt-kvarts- og kloritt-albittomvandling øker

Zn-innholdet til mellom 0,3 og 1,8 % (bilag 11a og 12a). Selv om sink øker endel i de øverste deler av tilførselssonen til verdier generelt mellom 100 og 1500 ppm, er det bare lokalt i mer perifere øvre deler (se bilag 10a) at sinkinnholdet når 1 til >2% og blir sammenlignbart med massivmalmen med sitt gjennomsnitt på ca. 2 % Zn.

Cd

Kadmium (se bilag 10a, 11a, 12a) viser meget god korrelasjon med sink, med et Cd/Zn-forhold omkring 4×10^{-3} . Dette er nært identisk med Cd/Zn i sinkkonsentrat fra Løkken (ca. 3.5×10^{-3}) og Løkken råmalm (ca. 5×10^{-3}).

Pb

Bly viser et mer uklart fordelingsmønster enn de foregående elementer. I noen grad er bly anrikt i en sone som strekker seg (i paleohorisontalsnitt gjennom tilførselskanalen) fra Cu-anrikningen til Zn-anrikningen. I de øverste deler fortsetter denne blyanrikningen videre utover til de mest perifere av de prøvetatte sulfidårer. Her varierer Pb fra omkring 40 ppm sentralt til 100-230 ppm i ytre deler (bilag 10b). Dypere ned i tilførselssonen avtar blyinnholdet til omkring 10 ppm sentralt og 30-90 ppm lenger ut (bilag 11b, 12b). Hele tilførselskanalen er således lav i Pb sammenlignet med massivmalmen med sine 400 ppm Pb i gjennomsnitt.

Au

Gull (se bilag 10a, 11a, 12a) har et fordelingsmønster svært likt det for bly. Au/Pb-forholdet varierer imidlertid noe, fra omkring 2×10^{-3} - 3×10^{-3} i sentrale deler av tilførselskanalen til generelt mellom $0,5 \times 10^{-3}$ - $1,5 \times 10^{-3}$ i ytre deler. Med andre ord er gull lavere - i forhold til bly - omtrent fra og med sonen med en viss Pb (og Au) - anrikning og videre utover i tilførselssonen. I nedre deler varierer gullinnholdet fra mellom 15 og <5 ppb sentralt, til 50-100 ppb i den

ytre anrikningssone. Øverst øker Au til 50 - 100 ppb sentralt og videre til 200 -300 ppb i ytre deler. Gullinnholdet i Løkkenforekomstens massivmalm er omkring 230 ppb i gjennomsnitt, med et gjennomsnittlig Au/Pb-forhold på ca. $0,6 \times 10^{-3}$, som i størrelsesorden tilsvarer det en finner i ytre deler av tilførselskanalen.

Ni og Cr

Nikkel og krom (bilag 10b, 11b, 12b) har nokså like fordelingsmønster i sulfidårene og begge viser liten variasjon innen de enkelte snitt gjennom tilførselssonen. En svakt negativ trend kan finnes fra dype til øvre deler, med Cr og Ni på henholdsvis ca. 140 og 17 ppm i borhull 2, og henholdsvis 70-120 og ca. 5 ppm i 'breksjemalm'-området. Gjennomsnittlig Cr og Ni i massivmalmen er 280 og 190 ppm.

Mn

Som nevnt foran viser Mn-variasjonene (bilag 10b, 11b, 12b) en viss overensstemmelse med mangan i bergartprøvene, med anrikning i noe perifere deler av tilførselssonen. Forøvrig er det som for Cr og Ni en negativ trend fra nedre til øvre partier. I borhull 1 og 2 (100-300 meter under malmnivå) er manganinnholdet i sulfidårene 70-185 ppm i sentrale deler og oppmot 900 ppm lenger ut i tilførselssonen. I de øverste deler varierer Mn mellom 10 og 100 ppm sentralt, for så å øke opp mot 300 ppm i perifere deler av tilførselskanalen. I Løkkens massivmalm er gjennomsnittlig manganinnhold ca. 700 ppm, m.a.o. sammenlignbart med perifere sulfidårer og mye høyere enn årer sentralt i tilførselssonen.

Det må bemerkes at det er usikkert hvorvidt innblanding av sidebergart influerer på Mn, Ni og Cr-innholdet i sulfidårene. Dette kan ha betydning spesielt i dypere deler hvor årene tildels har preg av tett impregnasjon eller 'replacement' av sulfider, i motsetning til høyere opp hvor mer rene sulfid sprekke-fyllinger er dominerende. Det er også usikkert i hvilken grad disse elementene inngår i ikke-sulfider i årene, som f.eks. kalsitt og kloritt. Den dårlige korrelasjon mellom Mn og Zn kan tyde på at manganvariasjonene ikke er knyttet til Mn i sinkblende (gjennomsnittlig Mn i sinkblende for Løkken er ca. 1000 ppm), men trolig heller går inn i f.eks. kloritt eller karbonater i årene (og i bergartsprøvene med Mn-anomalier).

SAMMENLIGNING MED ANDRE OMRADER

Omvandlingsbergarter i hydrotermale tilførselssoner til massive sulfider er undersøkt kjemisk i korrelerbare grønnsteiner i Vassfjellet ca. 40 km NØ for Løkken (Skjøla gruve), samt i større detalj ved Høydalsforekomsten 2 km øst for Løkken. Disse undersøkelsene er gjort av undertegnede tidligere, og bare hovedtrekkene vil bli nevnt her, for sammenligning med situasjonen ved Løkken.

I Vassfjellet (Skjøla gruve) er tilførselssonen dominert av kloritt-kvartsbergarter og overganger mot kloritt-albittbergarter tilsvarende de en finner ved Løkken. Jernrike kloritter gir tildels store Fe-anomalier i kloritt-kvartsdominerte varianter. Sink er gjennomgående betydelig anrikt, til mellom 200 og 1400 ppm, mens kobber er bare sporadisk anrikt - og i mye mindre grad enn Zn. MnO er forhøyet i varierende grad. Ba/K₂O forholdet er markert høyere: 0,02 - 0,06 mot omkring 0,01 eller lavere i 'bakgrunns'-grønnsteiner både i Vassfjellet og Løkken. Lite er kjent om massivmalmen i Skjøla gruve, men det er en meget liten forekomst (< 100.000 tonn ?) og den ser ut til å være dominert av Zn i forhold til Cu. Høydalsforekomsten ved Løkken er også relativt liten: den stratiforme massivmalmen kan anslås til i størrelsesorden 100.000 tonn. Massivmalmen er lav i kobber (generelt under 0,5 %) og også i kobolt i forhold til Løkken massivmalm. Sink, sølv, bly, nikkel og mangan-innholdet er sammenlignbart med Løkkenmalmens. For de sistnevnte elementer er det også som ved Løkken generelt, tildels betydelig lavere verdier i sulfidårer i tilførselssonen enn i massivmalmen, mens Cu og Co er like høyt og tildels høyere i sulfidårene. Omvandlingsmønsteret av nokså likt det en ser ved Løkken, men omvandlingen er betydelig mindre utviklet med noe mindre veldefinerte tilførselskanaler. I de øvre deler dominerer albittrike bergarter, med kvarts-sericittomvandling av basaltene bare helt sentralt (primært sure vulkanitter er ikke funnet her). I nedre deler er kloritt-albittbergarter dominerende, med kloritt-kvartsomvandling bare lokalt. Jernanrikningen i nedre deler er følgelig mindre markert enn ved Løkken. Til forskjell fra Løkken er både Cu, Zn og MnO anrikt i omvandlingsbergartene i både sentrale og perifere partier av de nedre deler av tilførselssonen (Cu anrikt i mindre grad enn Zn og MnO). Zn er anrikt både i øvre og nedre deler, mens Cu og MnO er lav øverst og øker nedover fra malmnivået. Co er generelt lav over det hele - også dette i motsetning til Løkken; likeledes er Cr (og Ni) tilsynelatende gått ut av basaltene, i mye større grad enn ved Løkken, under omvandlingen. I nedre deler av tilførselssonen kan Ba/K₂O-forholdet

også her være endel høyere enn normalt i grønnsteinene, i de øverste deler er imidlertid Ba nokså lav selv ved relativt høyt innhold av kalium.

DISKUSJON

Stratiforme massive sulfider i Løkken- og Vassfjellområdet har nesten uten unntak soner med stockwork mineralisering, disseminasjon og omvandling av vulkanittene på en side av forekomsten. Disse sonene opptrer på stratigrafisk underside av massivmalmene, og det er ingen tvil om at de representerer tilførselssonene for de hydrotermale malmdannende løsningene og at de massive sulfidene således er helt proksimale, dvs. de er utfelt på havbunnen direkte over tilførselskanalene. Ved Løkken, og tildels ved Høydalsforekomsten er disse sonene vel definert ned til 300 meter under malmnivået, og speiselt ved Løkken tyder alt på at tilførselssonen fortsetter som en spalteformet, klart avgrenset 'kanal' til betydelig større dyp. Tidligere undersøkelser foretatt av undertegnede i Høydal-Løkkenområdet tyder på at disse hydrotermale 'oppstrøms'-sonene ble lokalisert til svakhetssoner og tensjonsspalter assosiert med havbunnsspredning på en vulkansk oseanisk spredningsakse. I de dypere deler av lavasekvensen, fra 400-500 meter og mer under malmnivået er spesielt kobber 'lutet ut' oftest sammen med en viss omvandling av basaltene med markert økning av $\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ -forholdet. Cu-utlutning finnes ned til minst 1 km under malmnivå, og ved analogi med hydrotermale system på resente spredningsakser kan en anta at havvann har trengt ned til også betydelig større dyp i havbunnsskorpen hvor det ved stigende temperatur har kunnet reagere med basaltene og har transportert blant annet Fe, Mn, Ba og Ca og elementer som Cu, Zn, Pb etc. videre i løsning. Ved denne reaksjonen går Mg og tildels Na fra havvannet inn i bergartene. Forøvrig vil kalium (og rubidium) 'lutes' fra basaltene ved høytemperatur reaksjon med sjøvann, mens de samme elementer går fra sjøvann inn i bergarten ved lavtemperatur omvandling; dette gjenspeiles sannsynligvis i Løkken av et betydelig høyere K_2O -innhold i øvre deler av lavaserien, enn i de dypere deler hvor K_2O generelt er meget lavt. Også de hyppige hematittrike grønnsteiner i midtre deler av lavasekvensen i Løkken kan tolkes som resultat av den utstrakte hydrotermale aktivitet, i 'nedstrøms' delen av et sjøvanns konvesjonssystem i havbunnsskorpen: det er vist eksperimentelt at ved reaksjon mellom sjøvann og basalt ved temperaturer over ca. 250°C vil SO_4^{2-} i havvannet reduseres til H_2S ved at 'FeO' i bergarten tjener som

reduksjonsmiddel og selv oksyderes til F_2O_3 eller hematitt. (Ohmoto, Cole og Mottl, EOS, V.57, p.342, 1976).

På et visst punkt vil det nå modifiserte varme havvannet nå en maksimaltemperatur og begynner å stige raskt gjennom havbunnsskorpen, i en hydrotermal 'tilførselssone'. Hvorvidt dette fører til utfelling av massive sulfider på havbunnen, og størrelse og metallinnhold i den eventuelle avsetningen, vil være avhengig av flere faktorer, bl.a. varighet og intensitet på det hydrotermale systemet. Temperaturfall eller andre endringer i de fysiokjemiske forhold i oppstrømssonen kan føre til større eller mindre utfelling av sulfider før løsningene når havbunnen. Manglende 'isolasjon' av oppstrømssonen vil føre til massiv inntrengning av normalt, kaldt havvann i de permeable øvre 500-600 meter av havbunnsskorpen og kan gi total utfelling av sulfidene som sprekkefyllinger, årer og disseminasjoner på dypet. Både i Løkkenområdet (Svinsås) og Resfjellområdet (SV for Løkken) finnes hyppig slike mineraliseringer (uten kjente assosierte massimalmer), på inntil ca. $\frac{1}{2}$ km dyp under sannsynlig samtidig havbunnsnivå, som kan tolkes som resultat av blanding med normalt sjøvann i slike 'mislykkede' hydrotermale oppstrømssoner. I mange tilfeller reflekteres likevel den hydrotermale aktiviteten av avsetning av tykke jaspislag på den samtidige havbunnen.

Selv ved liten eller ingen inntrengning av normalt havvann i tilførselssonene vil imidlertid de oppstrømmende løsningene gjennomgå endringer i de fysiokjemiske betingelser. Adiabatisk avkjøling vil gi et visst generelt temperaturfall oppover, likeledes vil varmetap til sidene gi et generelt temperaturfall oppover i tillegg til temperaturgradienter mellom sentrale og perifere deler av tilførselssonen. Omvandlingsreaksjoner vil også kunne gi endringer i de fysiokjemiske forhold i sonen.

Mye av forskjellen mellom f.eks. Løkken- og Høydalsforekomsten kan forklares med noe ulike fysiokjemiske betingelser i deres hydrotermale tilførselssystem. Likeledes kan dette forklare variasjoner innen de enkelte tilførselssoner. I Løkken-feltet, f.eks., må en anta at en helt sentral sone har bevart tilstrekkelig høye temperaturer, og unngått innblanding av normalt sjøvann, slik at sulfider bare i svært liten grad ble utfelt her før løsningene nådde tett opp mot havbunnen. På begge sider av denne sonen har pyritt såvidt begynt å felles ut; samtidig har løseligheten av Cu åpenbart blitt overskredet slik at kobberkis (og samtidig endel sølv) er utfelt i mye større grad enn pyritt, både i årer og som disseminasjon. Eksperimenter har vist at løseligheten av Cu i NaCl-løsning avtar

meget hurtig i temperaturområdet 350-250°C, mens f.eks. Fe og Zn er mindre følsomme for temperaturfall. (Crerar og Barnes, Econ.Geol. V.71, p.772-794, 1976). Såvidt utenfor sonen med Cu-utfelling øker koboltinnholdet markert. Egne koboltsulfider er ikke kjent herfra, men en kan tenke seg at Co-innholdet i pyritt har økt drastisk i et område hvor løseligheten i Co ble overskredet i den hydrotermale løsningen, muligens p.g.a. videre temperaturfall. Co-innholdet i pyritt i denne delen av tilførselssonen øker til mellom 500 og 2000 ppm (dersom en antar at Co bakgrunnsverdier på 30-40 ppm inngår i Fe-Mg-silikater i bergarten og ikke i pyrittdisseminasjonen); dette er verdier som svarer godt til koboltinnholdet i pyritt i massivmalmen. I sentrale deler av tilførselssonen er det ikke mer enn 50-250 ppm Co i pyritten, og videre utover i perifere årer er det tildels enda lavere verdier. Sink har blitt holdt i løsning gjennom hele tilførselskanalen i dens nedre deler; utfelling av sinkblende har foregått bare i helt perifere deler, hvor temperaturen åpenbart har vært betydelig lavere og hvor en også kunne få mer total metall-sulfid-utfelling på grunn av større innblanding av normalt sjøvann. Det samme gjelder mangan som er transportert i løsning tildels til områder relativt langt ut fra tilførselssonen før det har gått inn i mineraler, trolig ikke-sulfider. I disse områder vil ganske sikkert blanding med normalt, oksyderende havvann ha betydning for Mn-løseligheten. Disse trekk stemmer meget godt overens med observasjoner ved aktive hydrotermalfelt som ved Galapagos og East Pacific Rise 21°N hvor Cu er anriket først og fremst i høytemperatur (ca. 350°C) løsninger, Zn transporteres i løsning også ved lavere temperatur (under 300°C), mens Mn er meget mobilt og utfelles sent også ved den fullstendige blandingen med havvann på sjøbunnen.

Dersom en betrakter variasjonene fra nedre til øvre deler av Løkken tilførselskanal og videre opp i massivmalmen finner en for mange elementer et mønster som tilsvarende det beskrevet ovenfor for et 'poleohorisontalsnitt'. Kobber blir i stor grad utfelt allerede i øverste del av sonen (sammen med endel sølv), mens spesielt sink bare i liten utstrekning er utfelt her og har passert videre i løsning, til fullstendig blanding med havvann på sjøbunnen og en nær total metallsulfid-utfelling. For de andre elementene har løseligheten i varierende grad blitt overskredet i de aller øverste deler av sonen, mens det vesentlige av metallinnholdet ikke ble utfelt før løsningene nådde havbunnen. Den hurtige økende sulfidfelling i øverste del av tilførselskanalen skyldes trolig for en stor del en betydelig inntrengning av normalt havvann ned i permeable øvre partier. Nær total sulfidutfelling fra en hydrotermal løsning kan skje allerede ved innblanding av 10 % normalt sjøvann (Drummond og Ohmoto,

Geol.Soc.Am.Bull.Annu.Meet., Abstr., 1980). Visse trekk ved omvangingen antyder også en høyere innstrømning av sjøvann omkring og inn i de øvre deler av tilførselssonen (se nedenfor).

Dersom en på denne bakgrunn betrakter forholdet mellom Løkken og Høydal, er det naturlig å tolke anrikningen av Zn (og Mn) gjennom hele tilførselssonen og den mindre anrikningen av Cu gjennom hele nedre del som uttrykk for at de fysiokjemiske forhold her var slik at løseligheten for Cu ble overskredet og ga kobberkissfelling allerede dypere nede. Sink ble følgelig også i stor grad utfelt i tilførselssonen, men i mindre grad enn kobber slik at de nå Cu-fattige løsningene fremdeles hadde høyt nok Zn-innhold til å danne en Zn-rik, Cu-fattig massiv sulfidavsetning da de nådde havbunnen. Generelt lavere koboltinnhold, både i massivmalm og årer/bergart i tilførselssonen ved Høydal passer inn i dette bildet. Størstedelen av sølv, bly og nikkel ble imidlertid heller ikke her utfelt før i massivmalmsavsetningen.

Ganske sikkert har det ved Løkken også vært mer intens og/eller langvarig hydrotermal aktivitet for å gi den mye større tonnasje av massivmalm pr. lengde-enhet langs tilførselskanal-åpningen. Det er vist eksperimentelt (Mottl, Geol.Soc.Am.Bull. V.92, p.161-180, 1983) at ved reaksjon mellom sjøvann og basalt ved 300°C vil omvandlingsmineralogien i stor grad være avhengig av masseforholdet sjøvann/basalt, med dannelse av kloritt-albitt + aktinolit og epidot ved relativt lave forhold og kloritt-kvarts ved høye forhold. Det er fristende å overføre dette til reaksjon i en tilførselssone, mellom basalt og hydrotermal løsning (modifisert havvann). En vil da vente en sammenheng mellom intensitet eller varighet (dvs. total mengde hydrotermal løsning gjennom et vist lengdesegment av tilførselssonen) og utbredelsen av kloritt-kvartsomvandling i forhold til kloritt-albittomvandling. I en perifer sone hvor permeabiliteten og gjennomstrømningen er minst vil en vente at kloritt-albittomvandling 'går foran' og etterfølges gradvis av kloritt-kvartsomvandling ettersom aktiviteten fortsetter. Disse forhold er akkurat hva man kan observere i tilfellet Løkken/Høydal: en utstrakt kloritt-kvartssone med en mindre, perifer kloritt-albittsone ved Løkken hvor den hydrotermale aktiviteten åpenbart har vært stor (tykk sulfidavsetning), og en tynn sentral kloritt-kvartssone omgitt av utstrakt kloritt-albittomvandling ved Høydal hvor malmen er betydelig mindre. I de øverste deler av tilførselssonene kan forholdene være analoge med dypere deler selv om mineralogien her vil være forskjellig: ved Løkken er kvarts-sericittbergarter dominerende med underordnede albittdominerte bergarter; ved Høydal er forholdet motsatt. Det må imidlertid bemerkes her at utgangsberg-

arten har vært forskjellig i de to tilfellene, hovedsaklig sure vulkanitter ved Løkken og basalter ved Høydal.

At klorittene dannet i selve tilførselssonen er jernrike er naturlig i betraktning av det meget lave magnesium og relativt høye jerninnhold i naturlige høytemperatur hydrotermale løsninger (f.eks. East Pacific Rise 21°N). På den annen side finnes det lokalt, i perifere deler av tilførselskanalen ved Løkken, kloritt-albitt og kloritt-kvartsbergarter som er klart anrikt på MgO. Noen av disse er også anomalt lave i totaljern. Økningen i Mg/Fe-forholdet i klorittene er spesielt markert i øvre perifere deler. (De sure vulkanittene er også anrikt i MgO i forhold til sannsynlig primær sammensetning). Det er naturlig å tolke dette som uttrykk for en viss innstrømning av normalt sjøvann - som er magnesiumrikt og meget fattig på jern - til de øvre perifere deler av tilførselssonen. Klorittene dannet under omvandlingen av basaltene vil da gjenspeile det høyere Mg/Fe-forholdet i løsningene i disse deler av sonen. Hvorfor sericitt blir et stabilt mineral, på bekostning av kloritt, i de aller øverste deler av tilførselssonen er foreløpig uklart. Det er imidlertid klart at det er en sammenheng mellom sericittinnholdet og den sterke utfelling av sulfider i øvre deler; samtidig er det i øvre deler en klar korrelasjon mellom K₂O og bor-innholdet (som er høyt i sjøvann). Dette kan kanskje antyde at også sericitt-anrikningen har sammenheng med innblanding av sjøvann til de øvre deler av systemet. (Sulfidutfelling kan skje umiddelbart ved innblanding av normalt sjøvann til hydrotermale løsninger - se foran).

KONKLUSJON

Massive, stratiforme sulfidmalmer innen ofiolittsekvensene i Løkkenområdet er utfelt på havbunnen direkte over dype spalteformige tilførselskanaler for hydrotermale, malmdannende løsninger. Resedimentasjon av sulfider fra disse primært proksimale avsetningene spiller en viss rolle både ved Løkken og Høydal. Tilførselskanalenes spalteform har i stor grad vært avgjørende for malmkroppenes form (kfr. den ekstremt elongerte Løkkenmalmen). De hydrotermale tilførselssonene representerer de avgrensede oppstrøms-delene av store sjøvann-konveksjonsceller drevet av store temperaturgradienter i den tynne basaltiske havbunnskorpen. Reaksjon mellom basalt og havvann i nedstrømsdelen av disse systemene reflekteres fremdeles i Løkkenområdet av blant annet anrikning av kalium og rubidium i øvre deler av skorpen (ved lav temperatur), oksydasjon av basaltene i øvre til midtre deler ved høyere temperatur, og markert utlutning av

f.eks. kalium og kobber i dypere deler (ved høyere temperatur). Samtidig er natrium og tildels magnesium anriket og kalsium redusert gjennom store deler av sekvensen. I oppstrømssonene (tilførselskanalene) har reaksjoner foregått mellom bergartene og de hydrotermale løsningene (med den opprinnelige sjøvann-sammensetning modifisert av de tidligere reaksjoner), samt med eventuelt normalt sjøvann som har kunnet nå inn i oppstrømssonene. Dette har gitt utstrakt kloritt-albittomvandling av basaltene, med videre overgang til kloritt-kvartsomvandling i sentrale deler; graden av kloritt-kvarts- i forhold til kloritt-albittomvandling er trolig avhengig av intensitet og/eller varighet av det hydrotermale systemet. En sterk anrikning av jern (både silikatbundet og totaljern) er karakteristisk; en anrikning av magnesium delvis koblet til tap av Fe i ytre/øvre deler av tilførselssonen ved Løkken reflekterer en viss innblanding av normalt sjøvann i disse deler. I de øverste deler av tilførselssonene ved Løkken og Høydal finnes en gradvis, men relativt hurtig overgang mot kvarts-sericitt-omvandling av både basalter og lokale sure vulkanitter, selv om også overganger mot nesten rene albittbergarter finnes. Albittomvandling er dominerende i øverste deler ved Høydalsforekomsten som er den klart minste av de to. Kvarts-sericitt/albittomvandling er ikke sett ved de øvrige forekomstene i området, som imidlertid ikke er studert i tilsvarende grad.

Tilførselssonen ved Løkken har en vidde på omkring 120-130 meter (med kloritt-albitt/kloritt-kvartsomvandling) og er meget vel-definert ned til minst 300 meter under malmnivået. Ved Høydal er dimensjonene i samme størrelsesorden, men sonen er noe dårligere definert; kanskje dreier det seg om to parallelle - omtrent samtidige - tilførselskanaler ved Høydal.

Alle hydrothermal-sonene ser ut til å ha et forhøyet Ba/Rb eller Ba/K forhold, noe som reflekterer et mye høyere Ba-innhold i de hydrotermale løsningene enn i normalt havvann. Et noe lavere Ba/K forhold igjen i de øverste deler ser ut til å følges av en anrikning av bor (B) og kan tyde på økt innblanding av sjøvann her, selv om dette foreløpig er noe usikkert.

Tilførselssonene er - ved siden av omvandling - karakterisert av sulfidmineralisering i årenettverk og som disseminasjoner. Utfelling av sulfidene - hovedsaklig pyritt, kobberkis og sinkblende - ble styrt av variasjoner i de fysiokjemiske betingelser innen sonene. Mineraliseringen øker drastisk i de øverste deler, hvor også kvarts blir vanlig i årene; dette forklares ved betydelig innblanding av normalt, kaldt sjøvann her. Fordelingsmønstrene for sulfidbundne elementer dypere ned i tilførselssonene, både i form av sulfidårer

og disseminasjoner, er også knyttet til overskridelse av de respektive elementers løselighet og reflekterer her i stor grad temperaturgradienter som de hydrotermale løsningene passerer - vertikalt såvel som lateralt. Ved Løkken har løsningene bevart tilstrekkelig høy temperatur i en helt sentral sone, med ubetydelig innblanding av sjøvann, slik at sulfider bare i liten grad ble utfelt her før løsningene nådde havbunnen (eller de aller øverste deler av tilførselskanalen.) Lateralt ut fra denne helt sentrale sonen som er svært lav i alle sulfidbundne elementer, finnes så en anrikning først av Cu (som kobberkis), videre Co (i pyritt), Pb, og Zn (sinkblende). Sinkblende er utfelt bare i helt perifere deler, hvor de hydrotermale løsningene kunne bli blandet med sirkulerende normalt sjøvann eller hvor temperaturen ellers var lav, og det aller meste av tilførselssonen er meget lav i Zn sammenlignet med den overliggende massivmalmen. Mangan følger i store trekk Zn, men er anriktet (i silikater ?) i metabasaltene helt ut til 60-70 meter ut fra selve tilførselskanalen. Forøvrig følger sølv i stor grad kobber, gull ser ut til å følge bly, og kadmium korrelerer med sink. Nikkel er også anriktet i massivmalmen i forhold til sulfidårene.

Anrikning av både sink (og tildels mangan) gjennom hele tilførselssonen ved Høydal, delvis med utfelling av betydelig med kobberkis i nedre deler, viser at de hydrotermale løsningene her ikke var i stand til å transportere sitt innhold helt opp til havbunnen i så stor grad som ved Løkken (enten dette skyldtes generelt lavere temperaturer i systemet, større innblanding av sjøvann eller andre faktorer). Følgelig er også den tilhørende stratiforme malmen stort sett fattig på kobber (og tildels kobolt), mens sink (sammen med mindre mengder bly, nikkel og også sølv) i større grad har nådd havbunnen og er blitt utfelt i den pyritt-sinkblende dominerte massivmalmen.

Manglende 'isolasjon' av de hydrotermale løsningene i oppstrømssoner har gitt betydelig innblanding av kaldt sjøvann som sirkulerte i de meget permeable, øvre 500-600 meter av havbunnsskorpen. Dette har ført til nær total sulfid-utfelling på dypet i mange tilførselssoner, i form av disseminasjoner og uregelmessige tynne årer. Slike 'mislykkede' hydrotermale tilførselskanaler opptrer hyppig i Løkkenfeltet, ofte med tykke jaspisavsetninger på den samtidige havbunnen som eneste uttrykk for den hydrotermale aktiviteten.

ANVENDELSESMULIGHETER I MALMLETING

Hydrotermale tilførselssoner har helt åpenbare anvendelsesmuligheter i prospektering etter massive sulfider. De utgjør i seg selv et målområde som sannsynligvis vil være mange ganger større enn deres assosierte massivmalm, og medregnet de primære dispersjonshaloene omkring selve tilførselssonene vil prospekteringsmålet bli enda større. Det er klart at nytten vil være spesielt stor hvor stratigrafien er invertert (som ved Løkken), der tilførselssonen kan tenkes å ha utgående i dagen over en dypere, 'skjult' massivmalm. Men også ved normal lagstilling vil geokjemiske anomalier kunne avsløre en nærliggende sulfidavsetning, for eksempel over forlengelsen - i en mer 'aktiv' del - av en omvandlingssone som er funnet i dagen. I et tilfelle som ved Løkken, ville en ved boring tvers på tilførselssonen til den kjente malmen (eller langs lagningen - normalt på malmaksen) kunne påvise, med stor grad av sikkerhet, om det eksisterer større parallellmalmer med egen tilførselskanal innen en viss avstand fra Løkkenforekomsten. Slike parallelle forekomster på samme eller omtrent samme stratigrafiske nivå kan tenkes dannet ved forflytninger av aktiviteten innenfor ett og samme hydrotermalfelt på havbunnen; slike forhold kan faktisk demonstreres ved Høydalsforekomsten.

Selve tilførselskanalene kan stort sett oppdages ved feltundersøkelser, på grunn av deres spesielle mineralogi og sulfidmineraliseringer (selv om mineraliseringsgraden avtar sterkt mot dypet). Ved lithogeokjemiske metoder kan imidlertid også primære dispersjonshaloer finnes i tilsynelatende normale, umineraliserte grønnsteiner utenfor tilførselssonene. Geokjemi kan også angi mer presist graden av omvandling innenfor selve tilførselskanalen, hvilket kan være vanskelig ved feltundersøkelser alene.

Geokjemiske undersøkelser av en eventuell funnet tilførselssone kan indikere sonens potensiale med hensyn til sammensetning og størrelse av en mulig assosiert massivmalm. Som diskutert foran vil det sannsynligvis være en viss sammenheng mellom graden av kloritt-kvartsomvandling (i forhold til kloritt-albitt) og den eventuelle malmens tonnasje (pr. lengde-enhet av tilførselssonen). Det samme kan kanskje overføres til graden av kvarts-sericittomvandling i forhold til albittisering, for de øverste deler. Bestemmelse av avstand til en mulig massivmalm synes derimot å være vanskelig på grunnlag av det eksisterende materiale; selv om det ved Løkken og Høydal er enkelte klare mineralogiske og geokjemiske variasjoner med avstand fra malmkroppene, er det usikkert i hvilken grad dette

kan overføres til andre tilførselssoner. Mer klar sammenheng synes det å være mellom sammensetning av sulfidmineraliseringene - både disseminasjoner og årer -, og sammensetningen på den eventuelle assosierte massivmalmen. Ut fra det som er diskutert foran, vil for eksempel stor grad av utfelling av de mest 'mobile' elementer som Zn, Ni, Pb og også Mn i ikke-sulfider være negativt. Mye (eller alt) av sulfidene kan da være utfelt i tilførselssonen, og Cu vil høyst sannsynlig være utfelt enda tidligere. Tilsvarende vil lave innhold av Cu, Co, Ag, Pb (og pyritt), sammen med lave Zn-verdier, spesielt i sentrale deler av en omvandlingssone, antyde at de fysiokjemiske betingelser var slik at det aller meste av metall-innholdet i de hydrotermale løsningene kunne transporteres til havbunnen for avsetning i en massivmalm.

I en mer regional eller semi-regional målestokk, kan et tenke seg at graden av utlutning av blant annet kobber fra dypere deler av ofiolittsekvensen kan gi en viss antydning om områdets potensiale for massive sulfider på et stratigrafisk høyere nivå.

CONCLUSION

Massive, stratiform sulphides within the ophiolitic sequences of the Løkken area precipitated on the sea-floor directly above deep sheet-like feeder-zones for the hydrothermal, ore-forming solutions. Reworking of parts of these primary very proximal sulphide depositions play minor role at some orebodies. The extensive, sheet-like forms of the feederzones have been important factors controlling the orebody morphologies (cf. the extremely elongate Løkken orebody). The hydrothermal feederzones represent the restricted upflow limbs of seawater convection systems, driven by large temperature gradients within the thin basaltic oceanic crust. Within the Løkken area, basalt-seawater reactions in the downflow limbs of such systems is still reflected by features such as potassium and rubidium enrichment in the upper parts of the crust (at low temperatures), oxidation of basalts in the middle to upper parts and a marked depletion of for instance potassium and copper in deeper parts (at elevated temperatures). Sodium and partly magnesium is enriched and calcium depleted through a major part of the sequence. In the upflow (feeder-)zones, reactions have taken place between rocks and the hot solutions (with the original seawater compositions modified by the earlier reactions), possibly together with a component of normal, ambient seawater which could mix with the hydrothermal solutions through permeable zones. These reactions have given extensive chlorite-albite alteration of the basalts, with a further transition to chlorite-quartz alteration in central parts; the

degree of chlorite-quartz in relation to chlorite-albite alteration apparently depend on the intensity and/or duration of the hydrothermal system. A strong enrichment of iron (silicate-bound as well as total iron) is characteristic enrichment of magnesium coupled in part to a loss of Fe in peripheral/upper parts of the feederzones may reflect some admixture of normal seawater into these regions. In the uppermost parts of the feederzones at Løkken and Høydal mines, there is a gradual but relatively rapid transition towards quartz-sericite alteration both of basalts and local acid extrusives, although transitions into nearly pure albite rocks also occur and are predominating at the small Høydal deposit. Quartz-sericite/albite alteration has not been observed at the other small ores in the district, however none of these have yet been studied in detail. At Løkken, the width of the feeder channel (with chlorite-albite/chlorite-quartz alteration) is 120-130 metres and it is very well-defined down to at least 300 metres below the massive sulphide level. The dimensions are of comparable size at Høydal, although the zone is considerably less well-defined here; it is also possible that two separate, parallel and nearly coeval feederzones are present at Høydal.

All hydrothermal upflow regions are characterized by higher Ba/Rb or Ba/K ratios as compared to background values. This reflects the strong increase of Ba concentration in the hydrothermal solutions from that of normal seawater. Somewhat lower Ba/K ratios again in the uppermost parts of the feederzones appear to be accompanied by enrichment of boron in the alteration products. This may indicate an increase in the seawater influx, although these problems need further investigations to be clarified.

Apart from the alteration, the feederzones are characterized by sulphides forming stockwork veins and disseminations. Sulphide precipitation, predominantly pyrite, chalcopyrite and sphalerite was here controlled by variations in the physico-chemical conditions within the hydrothermal upflow zones. Thus, the drastic increase in sulphide mineralization in the uppermost regions, where also quartz is an abundant constituent of the veins, can be explained by a significant influx of normal, cold seawater into these parts of the zones. Further down, the distribution patterns for sulphide-bound elements - in sulphide veins as well as disseminations - are related to a progressive exceeding of the solubilities of the different elements within the solution. To a great extent the patterns here probably reflect temperature gradients within the upflow zone, vertically as well as laterally. At Løkken, sufficiently high temperatures prevailed in a very central zone, with insignificant influx of ambient seawater, so that very little

sulphide precipitation took place here before the solutions entered the sea-floor (or the uppermost parts of the feederzone). Laterally away from this central zone which is very low in all sulphide-bound elements, there is first an enrichment of Cu (as chalcopyrite), then Co (in pyrite), Pb and finally Zn (as sphalerite). Precipitation of sphalerite took place only in the peripheral parts of the feeder channel where the hydrothermal solutions may have been mixed with the ambient seawater and where the temperature was relatively low, and the major part of the zone is very low in Zn. Like zinc, manganese is enriched in peripheral regions, but it forms a somewhat wider dispersion halo to more than 60-70 metres away from the feederzone proper. Moreover, silver accompanies chalcopyrite to a great extent, gold appears to accompany lead and cadmium is correlated with zinc. Nickel is low in the feederzone sulphides as compared to the massive orebody.

Enrichment of both copper and zinc (and partly manganese) throughout the feederzone at Høydal, with significant precipitation of chalcopyrite in lower parts, demonstrates that the hydrothermal solutions here were not capable of transporting their metal-sulphide contents up to the sea-floor, to the same extent as at Løkken (whether this difference relates to a generally lower temperature of the system, increased influx of normal seawater or other factors). Accordingly, also the associated stratiform sulphides at Høydal are in general low in copper (and partly cobalt), whereas zinc (together with minor amounts of lead, nickel and also silver) has reached the sea-floor to a much greater extent and was precipitated in the pyrite-sphalerite dominated massive orebody.

Insufficient isolation of the hydrothermal solutions in the upflow zones could lead to considerable influx of cold seawater which was abundant within the highly permeable, upper 500-600 metres of the oceanic crust. In many upflow zones this caused nearly total precipitation of sulphides at depth, in the form of thin irregular veins and disseminations. Such 'failed' hydrothermal feederzones are frequently found in the Løkken area, commonly with thick accumulations of jasper on the contemporaneous sea-floor as the only reflection of the hydrothermal activity.

APPLICABILITIES IN PROSPECTING

Hydrothermal feederzones have obvious applicabilities in the prospecting for massive sulphides. The actual feeder channels, with their sheet-like form, constitute targets considerably bigger than their associated massive orebodies, and the primary dispersion halos outside the feederzone proper add even more to

the prospecting targets. The utility is most evident where the stratigraphy is inverted (as at Løkken), where a feederzone possibly may be detected on the surface above a deeply buried massive orebody. Also in right-way up sequences however, geochemical anomalies may reveal an adjacent sulphide deposit, for instance above the extension - in a more 'active' part - of an alteration zone found at surface. In a situation like at Løkken, diamond drilling across the feederzone to the known orebody (or along the bedding plane, perpendicular to the ore axis) would allow one to establish, with a high degree of certainty, whether or not parallel orebodies with their own feeder channels exist within a certain distance from the Løkken deposit. Parallel deposits, on the same or approximately the same stratigraphic level might have been formed by displacement of the 'hot spring' activity within the same hydrothermal field on the sea-floor; such relationships can actually be demonstrated at the Høydal deposit.

The actual feeder channels, due to their particular mineralogical composition and sulphide mineralizations, can in most cases be detected by field investigations (although the sulphide mineralization is strongly decreasing towards depth). Lithogeochemical methods, however, may reveal primary dispersion halos even in apparently normal and sulphide-free greenstones outside the feederzones. Geochemistry also indicates more precisely the degree of alteration within the possible feederzone; this can hardly be done by field investigations.

When a possible feederzone has been detected, geochemical studies may also indicate its potential with respect to composition and size of the possible, associated massive orebody. As discussed above, there will probably be a relationship between the degree of chlorite-quartz alteration (in relation to chlorite-albite), and the size of the possible orebody (per length unit along the feederzone). In the uppermost parts of the zones, the same may apply to the degree of quartz-sericitic in relation to albitic alteration. Determination of the distance to a possible orebody, on the other hand seems difficult on the basis of the present material. Although certain mineralogical and geochemical variations are related to the distance from the orebodies at Løkken and Høydal, it is not yet clear whether these features apply to other feederzones. A more evident relationship however, is found between the composition of the sulphide mineralizations - both as disseminations and veins -, and the composition of the associated massive sulphides. As discussed above, extensive precipitation within the feederzone of the most 'mobile' elements, like Zn, Pb, Ni (and also Mn in rock samples) may suggest that most (or all) the metal-sulphide content was lost within the feederzone, and that Cu probably precipitated even earlier in the

upflow zone. Accordingly, low contents of Cu, Co, Ag and Pb (as well as pyrite), coupled to low Zn values, particularly in the central parts of an alteration zone, would suggest physico-chemical conditions favourable for transport of most of the metal content of the hydrothermal solutions up to the sea-floor, with subsequent precipitation and deposition in a massive orebody.

In a more regional or semi-regional scale, it may be possible to indicate the potential for massive sulphides within a certain area (at a higher stratigraphic level), based on the degree of for instance copper depletion from rocks in the lower part of the ophiolitic sequence.