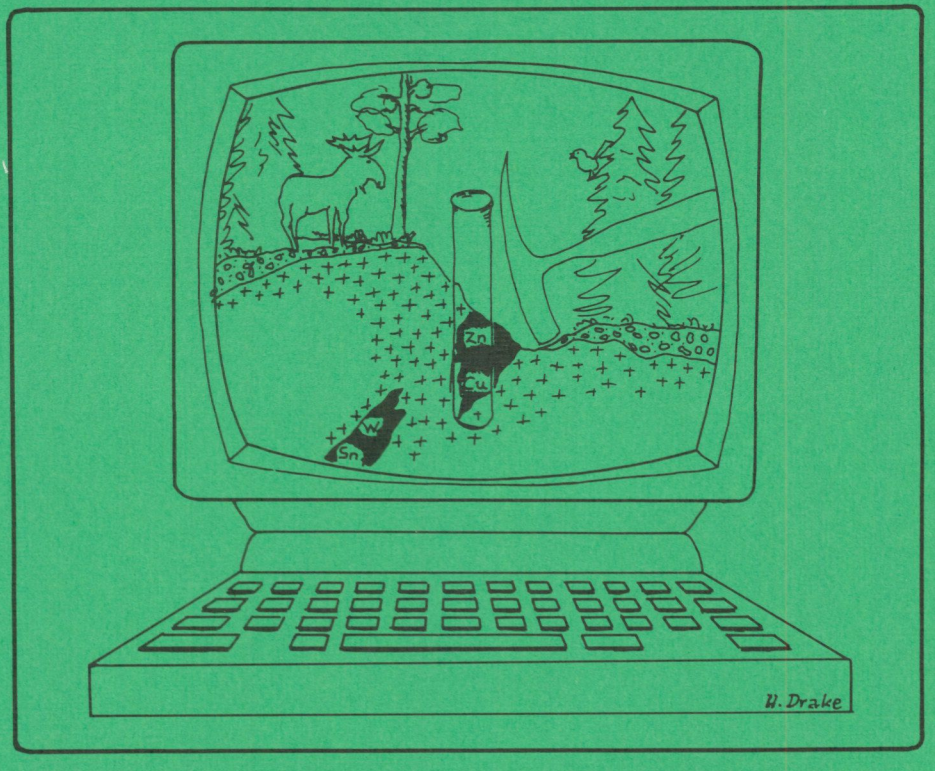
SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING
Rapporter och meddelanden nr 34

Berggrundsgeokemi som prospekteringsmetod i Sveriges urberg



Föredrag och inlägg från ett symposium i Uppsala den 17–18 mars 1983 anordnat av Sveriges geologiska undersökning och Svenska Gruvföreningen

O. Selinus (Red.)

Uppsala 1983

B E R G G R U N D S G E O K E M I S O M
P R O S P E K T E R I N G S M E T O D I
S V E R I G E S U R B E R G

Föredrag och inlägg från ett symposium i Uppsala
anordnat av Sveriges Geologiska Undersökning
och Svenska Gruvföreningen.

FÖRORD

Den 17-18 mars 1983 hölls ett symposium i Uppsala över ämnet "Berggrundsgeokemi som prospekteringsmetod i Sveriges urberg - nuläge och framtida möjligheter". Arrangörer var SGU och Svenska Gruvföreningen. Symposiet syftade till att ge en inblick i nuläget för berggrundsgeokemin som prospekteringshjälpmedel, att söka sammanfatta vad som hittills gjorts på detta område och få till stånd en diskussion om framtida möjligheter.

Bakgrunden var följande. Tillsammans med SGU arbetade 1980-82 en kommitté inom Svenska Gruvföreningens Forskningsberedning för prospekteringsteknik med en uppgift "Djupprospektering med hjälp av geokemiska anomalier - berggrundsgeokemisk undersökning inom Stollbergs malmfält, Kopparbergs län". STU hade 1980-07-15 beviljat ett anslag för detta projekt och en kommitté med följande ledamöter hade tillsatts: Erland Grip, ordf, Olle Selinus, SGU, Stefan Månsson, AB Statsgruvor, Folke Back, Bergslagens Geologi AB och gruvchef Rolf Öhrn, AB Statsgruvor. Senare hade tillkommit Lars-Göran Ohlsson och Stig Bjurstedt, LKAB Prosp. AB.

När slutrapporten som redovisades i december 1982 avfattades visade det sig önskvärt att få en överblick över alla berggrundsgeokemiska undersökningar som gjorts för prospekteringsändamål i Sverige. Under senare år har sådana undersökningar bl.a. utförts i ett stort antal svenska gruvor, men resultaten föreligger ofta bara i rapportform och har inte fått någon större spridning. Vid förfrågan visade det sig att berörda gruvföretag alla var intresserade av att lägga fram sina resultat och få dem diskuterade. Lämpligt forum borde vara ett symposium där resultaten från det just slutförda projektet i Stollberg kunde framläggas och diskuteras och jämföras med andra liknande projekt. Eftersom intresset såg ut att vara stort beslöts att ett symposium skulle hållas. SGU och Svenska Gruvföreningen ställde sig som inbjudare. Av utrymmesskäl visade det sig nödvändigt att begränsa programmet till att omfatta endast förekomster i urberg.

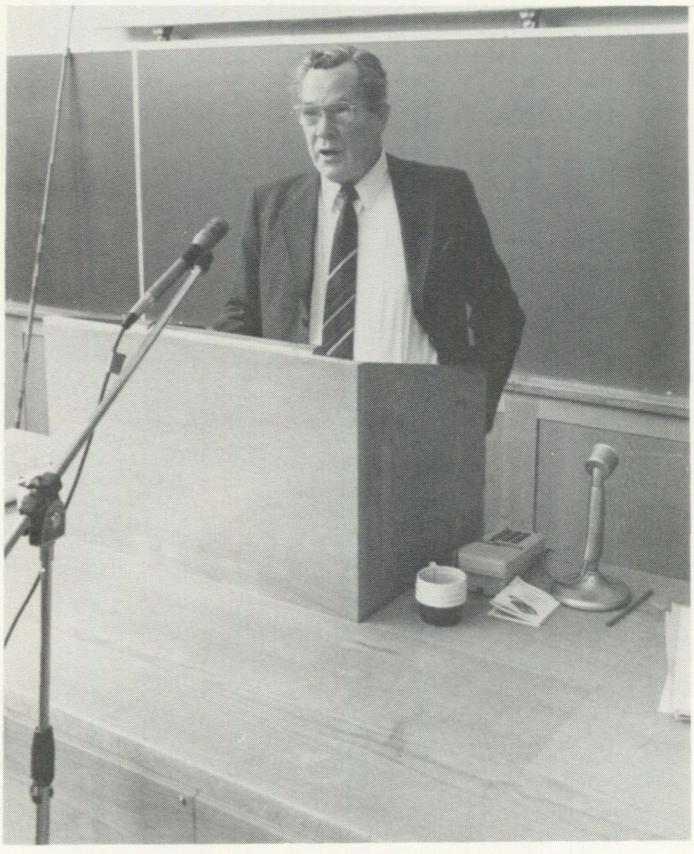
Symposiet rönte mycket stort intresse och bland de omkring 150 deltagarna fanns representanter från gruv- och prospekteringsbolag, universitet och högskolor, från STU, SGU, Bergmästarämbetet, Sv Gruvföreningen och från olika laboratorier samt från Geologiska Forskningsanstalten och gruvföretag i Finland.

Denna symposievolym som utgives med stöd från STU innehåller de föredrag som presenterades vid mötet även som en del av de inlägg som då gjordes.

Uppsala i maj 1983

Erland Grip
Sv Gruvföreningen

Olle Selinus
SGU



GD Arne Wesslén håller inledningsanförandet.



Ordf. i Svenska Gruvföreningen, S.G. Bergdahl
i väntan på att mötet skall börja.



Deltagare från olika bolag och organisationer.



Kaffepaus.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

		sid.
Förord		1
Foton		3
Innehållsförteckning		5
Session 1 Ordf. S.G. Bergdahl, Sv. Gruvföreningen		
A. Wesslén, SGU	Inledningsanförande	7
E. Grip, Sv. Gruvföreningen	Svenska urbergsmalmers geokemi - historik	9
L. Widenfalk, Luleå högskola	Provtagning för berggrundsgeokemiska undersökningar	13
F. Back, Bergslagens geologi AB	Centralt borrkärnearkiv för Bergslagen; bakgrund och framtida verksamhet	20
G. Svedenbäck, H.E. Larsson, J.O. Burman, SGAB	Analys av berggrundsgeokemiska prover	22
L.E. Carlsson, Lunds tekn. högskola	Geokemisk elementanalys med PIXE-metoden	37
O. Selinus, SGU	Statistiska metoder och databehandling av berggrundsgeokemiska metoder	51
K. Esbensen, Umeå Univ.	GDAM - an integrated strategy for multivariate geochemical data analytical modelling	66
Session 2 Ordf. L.G. Ohlsson, LKAB prosp. AB		
S. Bjurstedt, LKAB prosp. AB	Berggrundsgeokemi inom LKAB, undersökningar och förväntningar	90
K.M. Drake, Stockholms Univ.	Prospekteringsstrategi för optimal prediktion av granitoiders mineraliseringspotential	102
O. Selinus, SGU	SGU:s berggrundsgeokemiska undersökningar med exempel från Västerbotten och Bergslagen	126
P. Hedström, Vielle Montagne AB	Aspekter på sidobergsomvandling i samband med prospektering	145
B. Lagerblad, R. Gorbatschev, Lunds Univ.	Sekundära förändringar i Bergslagens vulkaniter och deras betydelse för malmbildningen	158
S. Hjorth, STU	STU:s insatsområde teknikutveckling för djupprospektering	176

		sid.
F. Back, Bergslagens Geologi AB	Apatitjärnmalmerna i Bergslagen; geokemiska undersökningar	180

Session 3 Ordf. A. Wesslén, SGU

S. Arvidsson, SGU.	Kvicksilver och andra element vid några malmer i Bergslagen	192
L. Widenfalk, Luleå högskola	Kvicksilver som malmindikator vid prospektering	205
U. Svensson, Boliden mineral AB	Geokemi i Västerbottens urberg	207
H. Zweifel, Boliden mineral AB	Geokemi i fast klyft - en sammanfattning av Bolidens undersökningar	214
L. Malmqvist, Boliden mineral AB	Några försök med nya metoder	220
M. Wilsson, SGAB	Bedrock geochemistry in exploration for Sn, Mo, W and U	221

Session 4 Ordf. E. Grip, Svenska Gruvföreningen

S. Ljung, NSG	Samordning av geologi, geofysik och geokemi i det systematiskt upplagda prospekteringsarbetet	225
Ö. Toverud, LKAB prosp. AB	Blickar framåt angående berggrundsgeokemi som prospekteringsmetod i Sveriges urberg	226
G. Armands, Stockholms Univ.	Urberget - vår framtid	229
O. Selinus, SGU	Berggrundsgeokemi enligt rysk modell	238

Berggrundsgeokemi som prospekteringsmetod i Sveriges urberg.

1983-03-17

Arne Wesslen
SGU
Box 670
75128 Uppsala

INLEDNINGSANFÖRANDE

Det är synnerligen glädjande att så många haft möjlighet att komma hit till detta första symposium i berggrundsgeokemi. Såväl för mig som representerar SGU som för direktör Bergdahl från Sv Gruvföreningen och givetvis för alla de som under lång tid arbetat aktivt för att detta symposium skulle kunna komma till stånd är redan det stora deltagarantalet en framgång. Jag är också övertygad om att framgången kommer att vara än mera påtaglig på fredag eftermiddag, då alla de specialister som arbetar inom detta fackområde haft tillfälle att framföra och dela med sig av sitt kunnande och sina erfarenheter

Det finns ju kanske inget enklare sätt att föra vetenskapen och metodutvecklingen framåt än att sammankalla ett symposium. Alla och envar får tillfälle att visa sina ideer,framsteg och nya rön, som i sin tur ger impulser för andras fortsatta forskning och utveckling. Samtidigt är det naturligtvis, i en så framstående skara som denna, en koll på att teorier eller metoder är riktiga.

Berggrundsgeokemin är naturligtvis en mycket ung vetenskap, som intimt hänger samman med den nästan otroliga analysutvecklingen som skett under efterkrigstiden. Då jag lärde kemi i slutet på 40-talet och man analyserade med våtkemiska metoder, kunde man inte ens drömma om att det skulle bli möjligt att på bergartsprover icke större än bråkdelen av ett gram med stor noggrannhet kunna analysera parts per milion eller parts per bilion av olika spårämnen eller att man i en maskin skulle kunna analysera ett 20-tal grundämnen samtidigt. Men då var inte heller den första datamaskinen tagen i bruk, den som hette Besk och fyllde ett helt rum på Teknis. Datautvecklingen är ju den andra förutsättningen för den unga vetenskap som vi innefattar i ordet berggrundsgeokemi. Datautvecklingen och analysutvecklingen har båda skett explosionsartat fort och vad beträffar analysmaskinen hand i hand.

De som nu läser och studerar, tar detta som självklart, och det tycker jag också är alldeles riktigt, det är deras plattform som de står på, och från vilken de blickar framåt - plattformen blir högre och utblicken vidare för varje framsteg som görs inom varje vetenskapligt område.

Berggrundsgeokemin är en mycket viktig del av den geologiska vetenskapen, den hjälper oss inte bara som ett malmletningsinstrument att finna nya malmer utan den ger också en del av

grunderna för en bättre förståelse för de bergartsbildande processerna.

Den har också lett till en bättre förståelse geologer emellan.

- När jag började som geolog var många tvingade att på mer rent teoretiska grunder och antaganden bygga upp sin tro på en del bergartsbildande processer o dyl. Det betydde också att det fanns olika skolor om vad som var rätt eller fel. En del geologer som var mycket starka i sin tro och övertygelse kunde därför knappt umgås med andra med lika stark tro, men som hade en helt motsatt uppfattning om hur det egentligen förhöll sig. - I dag har geologin bl a genom bergartsgeokemin blivit en mera exakt vetenskap, och geologer behöver inte längre tvista om den eller den teorin skall vara rättesnöret här i livet, i dag är det mera möjligt visa vad som är rätt eller fel.

Med denna korta inledning vill jag nu förklara det berggrundsgeokemiska symposiet öppnat.

SVENSKA URBERGSMALMERS GEOKEMI - HISTORIK

Erland Grip
Gideon Hydéns väg 11, 141 45 Huddinge

Nyligen har en berggrundsgeokemisk djupundersökning av Stollbergs malmfält slutförts och avrapporterats. Ledningsgruppen omfattade förutom geokemisten O Selinus även geologisk och geofysisk sakkunskap. I slutfasen av arbetet diskuterades vad nästa steg borde vara för att vidare utveckla geokemiska metoder för prospektering i urberg. Vi fann tiden vara mogen för ett symposium rörande denna fråga. De geokemiskt sakkunniga i landet borde komma tillsammans och grundligt gå igenom vad som gjorts beträffande berggrundsgeokemin som prospekteringsmetod i urberg, men framför allt diskutera vad som bör göras i fortsättningen. Detta är den direkta orsaken till att detta symposium blivit utlyst, och det stora antalet deltagare vittnar om att intresset är stort.

Innan vi börjar med föredrag och diskussioner vill jag gärna ge en liten återblick över den berggrundsgeokemiska malmprospekteringen i Sverige och en kort sammanfattning över dess omfattning och resultat.

För att kunna använda geokemin som malmletningsmetod bör man ha en allmän kännedom om malmernas kemiska sammansättning, både vad gäller de stora och de små elementen.

Det var först på 1930-talet som geokemin hos oss började tillämpas på malmer. År 1931 kom G Aminoffs studie över elementfördelningen i Långban och 1935 följde S Landergrens studier över några sulfidmalmers geokemi. Året därpå skrev Landergren om geokemin hos några svenska järnmalmstyper. Analyserna för dessa arbeten utförde Landergren i Tyskland.

De kemiska analyserna var tidskrävande och dyra, men spektralanalysen hade nu utvecklats så att säkra och snabba analyser av många element kunde erhållas till rimliga priser.

Ett geokemiskt laboratorium inrättades 1940 på SGU under ledning av Landergren och han fortsatte där sina järnmalmsstudier. Resultaten framlades 1942 i en avhandling om Grängesbergsfältets geokemi och sedan, 1948, i doktorsavhandlingen "On the geochemistry of Swedish iron ores and associated rocks". Han lägger här stor vikt vid den statistiska behandlingen av analysmaterialet.

Ungefär samtidigt med SGU hade Boliden under E Dahlströms ledning inrättat ett geokemiskt laboratorium där framför allt sulfidmalmer och deras sidoberg studerades. Från denna tid och framåt togs generalprov av företagets alla malmförekomster och deras olika malmtyper och fullständiga analyser gjordes på varje prov. Alla viktigare nyupptäckta mineraliseringar behandlades på samma vis och i kritiska fall även malmblock. En stor del av dessa analyser har sedan under årens lopp publicerats på olika håll med början av O H Ödmans Bolidenavhandling 1941.

Geokemiska laboratorier har senare inrättats vid universitetens och högskolornas geologiska institutioner och vid flera företag så att det numera finns ett flertal goda laboratorier. Endast ett fåtal är emellertid speciellt inriktade på malmundersökning.

Sedan 1940-talet har de flesta av landets sulfidmalmsförekomster blivit beskrivna , var för sig eller flera tillsammans. I dessa arbeten har i regel även de geokemiska aspekterna tagits upp och några, t ex S Gavelins arbete om elementfördelningen i Rävliden och C A Nilssons Bolidenarbete har ren geokemisk inriktning. Många av dessa geokemiska studier föreligger bara i stencilerad form och vanligen i mycket små upplagor. Så är fallet med Gruvforskningens rapporter inom Svenska Gruvföreningen och slutrapporter till anslagsbeviljande institutioner.

Efter Landergrens undersökningar av järnmalmer gjordes i slutet av 1960-talet och framåt omfattande geokemiska studier av bandade järnmalmer, särskilt i Riddarhytte - Norbergstrakten. De leddes av O Brotzen och utmynnade i ett flertal smärre publikationer och stencilerade rapporter.

Järnmalmerna i Norrbotten har i samband med geologiska beskrivningar även blivit geokemiskt behandlade, särskilt i R Frietschs och T Paråks arbeten.

Över våra viktigare sulfidmalmer finns moderna geokemiska undersökningar men resultaten föreligger bara i stencilerade rapporter. I dag och i morgon kommer vi emellertid att få ta del av dem genom föredrag.

Totalt finns i de malmgeologiska arbeten som publicerats sedan 1940-talet ett mycket stort antal kemiska analyser av malm och sidoberg. Analysnoggrannheten är naturligtvis ojämn, men i stort sett kan man säga att analyserna blivit allt bättre och detta gäller framför allt småelementen. I många publikationer har analyserna mest fått stå som illustrationer till text och figurer, men i andra förekommer mer eller mindre ingående statistisk behandling och diskussion av analysmaterialet. - I stort sett kan man säga att vi numera har en god bild av såväl järnmalmernas som sulfidmalmernas kemiska sammansättning både i fråga om huvudelement och småelement.

Något sämre är nog förhållandet på bearbetningssidan, men vi vet ändå rätt mycket om vilka element som följer varandra och i vilka proportioner de gör det. En modern statistisk bearbetning av det stora analysmaterialet skulle kanske kunna ge ännu mycket mera, men här rör det sig om en bedömning. Skall man betrakta analyserna, och särskilt de äldre, såsom varande tillräckligt noggranna för ett så stort arbete?

Ett flertal av de publicerade geokemiska undersökningarna behandlar enstaka element eller några få sådana i förhållande till varandra. Bland de element som behandlats på detta vis är Hg och Zn, Sn, W och Mo, S och Se, Ni och Co, Pb och Ag. I järnmalmerna har särskilt studerats Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, P och Sn.

Uran och torium har varit föremål för omfattande studier, och i fråga om dessa element synes geokemiska undersökningar verksamt ha bidragit till positiva prospekteringsresultat.

Tidigare har hållits ett par symposier om geokemisk prospektering. Ett informationsmöte rörande "Geokemisk prospekteringsteknik" hade ordnats 1975 av STU m fl och förra året svarade STU och Geologiska institutionen i Lund för ett diskussions- och informationsmöte om pågående geokemiska undersökningar i Bergslagen. - Vårt möte idag och i morgon gäller "Djupprospektering i urberget". Avsikten är att

vi skall få en snabb överblick över vad som gjorts i fråga om geokemi som djupprospekteringsmetod. Vad säger de hittills utförda undersökningarna? Har de givit sådana resultet att man skall fortsätta? Är metoden för kostsam? Kan den göras billigare? Geokemin är en av många prospekteringsmetoder, och i allmänhet brukar man använda flera metoder vid en prospekteringskampanj. Vad ger då geokemin utöver vad den geofysiska malmletningen ger? Och framför allt: Skall man satsa på geokemi som djupprospekteringsmetod i framtiden? - Detta är några av de frågor som jag hoppas att vi skall få besvarade under symposiet idag och i morgon.

Provtagning och provtagningsmetoder för berggrundsgeokemiska arbeten.

Lennart Widenfalk
Avd. för Ekonomisk Geologi
Högskolan i Luleå

Provtagning för bergrundsgeokemiska arbeten innefattar en mängd olika typer av arbetsområden och enkla råd för provtagning kan därför inte ges utan att ändamålet med provtagningen först definierats.

Vilka ändamål kan vi då tänka oss ? Vi kan till exempel vilja karaktärisera en bergartstyp eller en provins eller försöka spåra en zonering och gradvis förändring av sammansättningen i en bergmassa. Vi kan söka förändringen av huvudelement eller spårelement eller ha andra specifika mål. Den ekonomisk-geologiska berggrundsgeokemin kan syfta till att finna malm med hjälp av olika zoneringsmönster, där mönstret kan sägas vara ringarna på en måltavla och malmen själva "bulls eye". En annan utgångspunkt kan vara att undersöka malmer och omvandlingszoner för att försöka förstå malmgenesen och detta är ju i sig ett prospekteringshjälpmedel. Även en uppborrning av en malm med åtföljande kemisk analys och malmberäkning kan sägas vara ett kvalificerat berggrundsgeokemiskt arbete.

Då vi (i allmänhet) vet ändamålet med vår provtagning, vilka är då de ytterligare synpunkter man kan ha på provtagningsarbetet? Vi måste bestämma provtyp, provstorlek och provtäthet och samtidigt bedöma kontamineringsriskerna. Vidare spelar analys- och tolkningsmetodiken en viktig roll för provtagningen liksom de (begränsade) ekonomiska ramarna.

Då analys- och tolkningsmetodik kommer att behandlas på annan plats under detta symposium vill jag här bara påpeka vikten av att de kemiska analysmetoderna och provtagningsmetoderna står i någon sorts proportion till varandra: en noggrann och dyrbar kemisk analys kan vara bortkastad om provtagningen är slarvigt utförd. Vidare måste man alltid ställa sig frågan om vilken analysnoggrannhet men verkligen behöver. Räcker två siffrors noggrannhet för att göra den bedömning man avser så kan man kanske analysera med en billig metod och därmed haråd med fler analyser.

En fråga man också måste ställa sig är: behöver jag analysera överhuvudtaget? Denna fråga uppkommer ofta under avslutningsskedet av ett arbete där man redan gjort ett antal analyser och ser att det finns icke analyserade delar eller områden, som man närmast av estetiska skäl vill fylla igen.

Kan de nya analyserna tillföra värdefull information skall de genomföras, men ofta visar det sig att man klarar sig utan.

Provtyper

Med provtyper avses i detta sammanhang med vilken typ av hjälpmedel man tagit sitt prov. När det gäller berggrundsgeokemisk provtagning finns det i huvudsak två typer av prov nämligen dels stuffprover, uttagna mer eller mindre för hand, och dels någon form av borrprov.

För systematisk provtagning med korta intervall (0 - 100 m) har den vanliga stuffprovtagningen uppenbara begränsningar till hällrika områden och gruvor.

Fördelen med stuffprovtagning är framförallt att man kan få stora provmängder och att området runt provet kan kartläggas i detalj. Vanliga hällar kan ge en god två-dimensionell bild av provläget och i en gruva kan provets läge i förhållande till bergartsgränser, omvandlingar osv kartläggas i tre dimensioner.

De problem som kan drabba stuffprovtagningen är, förutom bristen på hällar, olika föroreningar och ytvittring. Dessa kan dock oftast överkommas genom att stora provmängder kan sprängas loss.

En nysprängd gruvort erbjuder som regel inga provtagningsproblem. Med tiden sker dock en ytuppsprickning och cirkulerande gruvvatten kan ge sprickfyllnader, som kan störa åtminstone spårelementmönstret.

Av borrprover från fast berg finns dels kärnborrning och dels kaxborrning. Både typerna av prover är endimensionella observationer, vilket är den största nackdelen förutom kostnaderna.
Kärnborrning - diamantborrning - är den avgjort dyraste av alla provtagningsmetoder, åtminstone om man ser till de direkta kostnaderna. Detta har medfört att alla detaljerade geokemiska undersökningar nästan uteslutande utförts på malmer eller mineraliseringar där borrningarna redan genomförts enbart i syftet att borra upp malmen..

Den avgjort största fördelen med kärnborrning är att man(i princip) kan nå dit man vill oavsett om det är under en sjö eller om det är djupt beläget (0 - 10 km) och är i många fall den enda möjliga provtagningsmetoden. Vidare kan provtagningen göras mycket tät längs kärnan och varje provläge kan fastställas mycket exakt.
En noggrannt utförd borrning med erfaren borrpersonal kan ge provlägen med en felmarginal av endast några få cm. Denna lilla felmarginal kan dock vara

en schimär om inte borrhålet är krökningsmätt. Med de gängse SGU- och EASTMAN - metoderna kan hålavvikelser på några få meter erhållas även om borrhålen är flera hundra meter. Dessa metoder kräver dock magnetiskt störningsfria områden. FOTOBOR metoden , som utvecklats i Malmberget, ger dock möjligheter till krökningsmätningar även i magnetitmalmer.

Som redan nämnts är kärnborrning en dyrbar provtagningsmetod och kostnaderna för diamantborrning torde idag ligga på i medeltal ca 400 kr/borrmeter, men varje borrningsobjekt kräver sin egen kostnadskalkyl.

De senaste årens utveckling inom diamantborrningsområdet kan knappast sägas ha varit revolutionerande. Maskiner och utrustning har dock succesivt utvecklats och diamantborrningens ökade kostnader under de senaste årtiondet är till största delen lönekostnadsökningar. Till de senaste årens mest intressanta utveckling i Sverige hör införandet av tunnväggiga borrkronor och satsningen på Wire-line borrning.

De tunnväggiga borrkronorna har gett en effektivare borrning samtidigt som volymen berg i kärnan har ökat, vilket i sin tur har gett större provvolymer. Wire-line borrningen är internationellt en mycket gammal borrmetod men har inte kunnat konkurrera i Sverige förrän under de senaste åren. Wire-line borrningens största fördel ligger i att den tids- och kostnadskrävande rörkörningen till stora delar är borttagen. I områden där berggrunden är svag och där borrhålen har en tendens att rasa igen kan denna borrningsmetodik vara den enda möjliga då man ju slipper dra upp rören för varje fyllt kärnrör.

Under rubriken KAXBORRNING för jag alla typer av roterande, stötande, krossande och malande borrning, som ger ett uppkrossat prov. Denna typ av provtagning har starkt vunnit terräng gentemot diamantborrning när det gäller ytliga (0 - 30 m) prover. De utrustningar man använder är vanligen standardbergborrmaskiner, som finns utvecklade för snart sagt alla håldimensioner. Som ett bevis för metodens tillförlitlighet kan nämnas att nästan alla stora dagbrott runt om i världen detaljstyr sin brytning med

hjälp av provtagning av borrkax från sina bergborrmaskiner.

Från slutet av 60-talet och framåt har olika utrustningar för systematisk provtagning av berggrund genom morän utvecklats. Dessa utrustningar bygger numera helt på kaxborrningsprincipen och detta har medfört att provtagningskostnaderna har sänkts och därmed utföras just systematiskt. I Sverige arbetar för närvarande ett flertal företag från både Sverige och Finland med denna typ av provtagningsutrustning. De arbetar helt inom malm- och mineralprospektering men de torde kunna utgöra ett rimligt alternativ även för universitetsbaserade forskare för systematiska berggrundsgeokemiska arbeten.

I de flesta av Sveriges kommuner finns entreprenadfirmor och lastbilscentraler med tillgång till bergborrmaskiner av olika typ. Dessa är numera - enligt lag - utrustade med dammavskiljare, som i många fall lämpar sig som provuppsamlare. Det är alltså relativt enkelt att på de flesta ställen hyra in borrmaskiner till en billig penning för provtagning. En varning är dock på sin plats här. Utförs borrningen rutinmässigt är risken för olika kontamineringar stor. Hela provtagningsproceduren, med borrning, byte av provpåsar mm måste kontinuerligt övervakas av dig själv.

I gruvor finns ofta en hel arsenal med bergborrutrustning från lätta enhandsmaskiner för gruv-elektrikern till stora flerboms aggregat. De lätta enhands maskinerna har använts i BOLIDENs gruvor i många år för systematisk provtagning av malm och mineraliseringar. I dessa gruvor kan denna lätta utrustning möjligen vara ett alternativ till stuffprovtagningen vid geokemiskt arbete. Övrig borrutrustning underjord använder vatten som spolmedel och en provtagning med dessa kräver tillgång till stora kärl för uppsamling av spolvattnet. I dessa kärl får sedan borrkaxet sedimentera, helst under flera timmar, innan vattnet kan hällas av och provet tas.

Provtagning med kaxborrning medför att proven homogeniseras mellan borrningens ändlägen och en noggrann urspolning med vatten eller luft

måste göras mellan varje prov för att undvika en utjämning mellan proven.

Provstorlekar

Kravet på provets storlek för en geokemisk undersökning bestäms av bl.a. bergets homogenitet, de ingående mineralens kornstorlekar, vilka haltnivåer vi är intresserade av och vilken noggrannhet och reproducerbarhet vi kräver av den kemiska analysen.

Lättast inser man provstorlekens betydelse genom att jämföra en liten bit av en finkornig granit med en lika stor bit av en grovkornig pegmatit. Både granit och pegmatit kan ha samma kemiska sammansättning och mineralogi i stort men medan den lilla granitbiten kan ge en fullständig bild ev hela granitmassivets kemi och mineralogi kan pegmatitbiten vara homogen kvarts och inget annat.

Starkt inhomogena bergarter som till exempel ådergnejser eller skiktade vulkaniter kan ibland vara omöjliga att provta på ett representativt sätt med enbart stuffprovtagning. Alternativen är dels att helt låta bli att provta eller att tillgripa en kontinuerlig provtagningsmetod som borrning.

Rent generellt kan sägas att ett prov på några få kilo täcker de flesta behov och bergartstyper vi vanligen arbetar med. Vill vi analysera på element på mycket låga nivåer- några ppm till ppb - och ha statistiskt säkerställda värden tvingas vi öka provvikterna avsevärt. Teoretiska beräkningar utförda av Govett (1983) visar att man för grovkorniga bergarter och låga haltnivåer kan behöva prover på flera ton för ett fullgott analysvärde. Wager & Brown (1960) har dock visat att man i normalfallet intebehöver större prover än ca fem kilo. Man får i detta sammanhang inte glömma att man vid tolkningen av analysvärdena också måste medta provstorleken som en faktor. Det är ju ibland så att man inte har mer än några gram av ett prov, men är då provtagningen fullgod kan ändå analysen av detta prov ge tillräcklig information för en tolkning.

Provtäthet

Av grundläggande betydelse för bestämning av provtätheten är vetskapen om storleken och dimensionerna på de variationer vi vill undersöka. Man bör alltså veta en del av det svar man söker redan före provtagningen.

En tät provtagning minskar riskerna för att man skall undgå variationer i liten skala men är samtidigt dyrbar jämfört med en glesare provtagning. Detta är ett grundläggande dilemma för all geokemisk provtagning.Det ideala är naturligtvis att provtagningstätheten är något mindre eller kortare än bredden på den minsta variationen.

Provtagningsproblem som provtäthet och tolkning av geokemiska prover har sysselsatt många forskare och prospektörer och att nämna enbart ett fåtal ställer sig svårt, men Handbook of Exploration Geochemistry, Vol 2 (Garrett) och Vol 3 (Govett) ger utmärkta genomgångar och diskussioner av ämnet. Personligen anser jag att geostatistiska metoder lämpar sig väl för att avgöra lämplig provtäthet (David, 1977). Man bör då dela upp sin provtagning i flera steg och med en inledande serie prover tagna med korta avstånd. Med hjälp av ett sk variogram,eller oftare semi-variogram, kan man sedan grafiskt bestämma dimensionerna på det variationsmönster man vill undersöka.

Kontaminationsrisker

Varje prov man tar löper alltid risk att kontamineras av främmande material under hela provtagnings och provbehandlingsförloppet. Det bästa råd man kan ge till en person som arbetar med geokemiska undersökningar är att själv delta i och följa hela provcykeln från häll till analysutrustning. Endast genom att göra detta har man någon möjlighet att förklara (eller bortförklara) att vissa prover visar analysvärden som inte kan förklaras med geologiskt - geokemiska orsaker.

Som redan nämnts ovan kan oilka typer av vittringsfenomen ge icke önskvärda kontamineringar, men en noggrann provtagning förhindrar i allmännhet

detta. De alvarligaste föroreningsriskerna föreligger under provhanterings-stadiet eller då olika typer av maskiner kommit till användning vid provtagningen.

Olika typer av smörjmedel, oljor mm kan bidraga med spårhalter av Mo, V, Hg m.fl ämnen.

Vid borrning , där materialet krossas till kax, finns alltid en viss risk att provet kontamineras med W, Co, Fe, Cr m.fl legeringsmetaller. Vid denna typ av borrning kan det vara lämpligt att försöka få dubbelprover för kontroll.

Under krossning och malning på laboratoriet kontamineras proverna av det gods som finns i krosskäftar och malfat. Dessa föroreningar är i allmännhet desamma som vid kaxborrning. Speciellt under finmalningsförloppet är proven känsliga för kontamineringar. Här har provstorlekarna reducerats och den aktiva ytan på mineralkornen har ökats avsevärt. För känsliga prover bör därför alltid agatutrustning användas för finmalning.

Den provmängd, som slutligen går in i analysutrustningen, är som regel mycket liten i förhållande till den ursprungliga- endast något gram eller delar av gram. Detta medför att att man under hela provbehandlingsförloppet är tvungen att homogenisera provet före varje neddelning och även efter det sista malningssteget. Om provet transporteras i malt tillstånd, skakas eller vibreras kan tunga mineralkorn sjunka mot botten och provet blir inhomogent och upprepade analyser kan då visa stor inbördes skillnad.

Litteratur:

David, M.: Geostatistical Ore Reserve Estmation, Elsevier, 1977

Garrett, R.G.: Sampling Methodology, in Handbook of Exploration Geochemistry, Vol 2, Elsevier, 1983.

Govett, G.J.S.: Sampling, in Handbook of Exploration Geochemistry, Vol 3, Elsevier, 1983

Wager, L.R. and Brown, G.M.: Collection and preparation of material for analysis. In Methods in Geochemistry, Interscience, 1960.

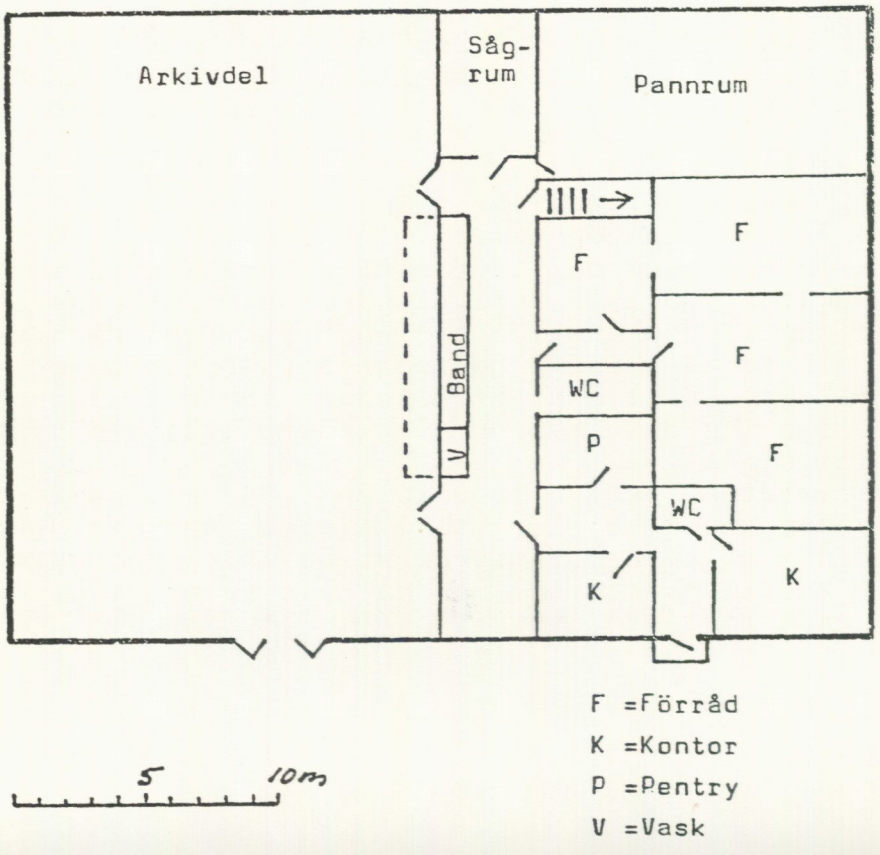
Centralt borrkärnearkiv för Bergslagen; bakgrund och framtida verksamhet

Folke G. Back
Bergslagen Geologi AB
Blötbergsvägen 37B
771 00 Ludvika

Hösten 1979 påbörjades det s k borrkärneprojektet inom Kopparbergs län med stöd av länets myndigheter,landstinget,utvecklingsfonden,gruvindustriarbetarförbundet,bergmästarämbetet och flertalet av inom länet verksamma gruvföretag.Dessutom medverkade NSG och SGU med observatörer inom projektgruppen.
Undersökningarna syftade till fynd av prospekteringsuppslag i det samlade kärnmaterialet.Efter granskning och analyser framförallt av legeringsmetaller, som i några fall ledde till specifika prospekteringsinsatser, samlades kärnmaterialet för uppmärkning och transport till det nu så gott som färdigställda centralarkivet i Håksberg.Motiven för upprättandet av ett centralarkiv i samband med kärnundersökningen var följande
-dels skapa förutsättningar för centralt arkiv i regionen med hänsyn till den expansion av borrkärnmeter som sker fortlöpande
-dels att förhindra att det kapital och kunskap som kärnorna representerar förstörs genom att gruvföretagen inte har möjlighet att arkivera dem; behovet av framtida användning bör tillgodoses
Projektet möjliggjorde vidare till väsentlig del den berggrundsgeokemiska undersökningen över Stollbergsfältet (utförd inom SGU med stöd av STU och Svenska Gruvföreningen), som kommer att redovisas av Selinus under detta symposium.
Borrkärneprojektet utökades med en andra etapp med kärnor från Värmlands,Örebro och Västmanlands län.Vidare har kärnor från Gävleborgs län tillförts arkivet och ytterligare tillskott är att vänta från några gruvbolag.
Frågan om geodatering (tillämpning av "coremap" och"geomap") togs från början upp med SGU som blivande huvudman för arkivet.
Kärnmaterialet har erhållit identiteter enligt kodsystem givet av SGU (EXTA-,EXTB-,osv. för respektive företag samt särskiljande med 5-siffriga löpnummer).
Kärnorna förvaras,dels i bearbetningslokaler(Fig.1)(gamla gruvstugan,Håksberg),dels i anrikningsverket(slutförvaring).Antalet kärnor(på pall) uppgår till c:a 3000 st. från centrala Bergslagen.De infogas i SGU's georegister.Bergmästarämbetena ansluts till registret och får således snabb tillgång till värdefulla upplysningar i samband med gruvrättsliga förrättningar (inmutning,utmål).
Kärnmaterialet avspeglar resultaten av de prospekteringsteoretiska överväganden som lett till gjorda insatser.Denna beslutsbakgrund,den må vara positiv eller negativ, bör vara till ovärderlig nytta,om och när man på nytt avser utföra prospekteringsarbeten inom ett område.

Huvudman för arkivet är SGU.Detta innebär att det till SGU överlämnade materialet blir tillgängligt för envar som önskar information.Dock torde en viss anmälningsplikt(enligt avtal som avses upprättas mellan SGU och gruvföretagen) föreligga om man önskar provta vissa kärnor.
En rationell hantering måste betraktas som nödvändig och en förutsättning för positiv betydelse för framtida prospekteringsarbete.Tillgänglighet och överblick är alltså önskvärd.
Den dokumentation som idag saknas (protokoll,kartor,mätresultat,analyser m m) beräknas finnas på plats inom några månader.Sker inte denna komplettering omgående föreligger stor risk för förstörelse av grunddata,eftersom gruvbolagen nu snabbt avvecklar gruvdelen.Dessutom "försvinner" inom prospekteringsområdet kunniga personer.
Det samlade kärnmaterialet bör även få stor betydelse för övervägande av geotermisk art, och det kan vara skäl hänvisa till de geotermiska undersökningar som utförts i borrhål inom ett antal gruvområden (ex. Håksberg,Stollberg).
Viktiga uppgifter för hydrogeologin finns att hämta ur kärnmaterialet.Det är t ex troligt att den nyutkomna hydrogeologiska kartan över Västmanlands län fått ett annat detaljutseende inom de norra länsdelarna om framtagna resultat från borrningar och gruvundersökningar varit kända inom SGU.Även för övrig kartverksamhet inom Bergslagen torde det samlade kärnmaterialet vara av väsentlig vikt.
LKAB PAB's förläggning av verksamheten i Håksberg ökar kärnarkivets betydelse liksom det ökade intresset att utnyttja kärnorna inom den geologiska forskningsverksamheten vid högskolor och universitet.

Fig.1 Bearbetningslokal,centralarkiv,Håksberg, SGU/83



ANALYS AV BERGGRUNDSGEOKEMISKA PROVER

Gunnar Svedenbäck, Hans E. Larsson och Jan-Ola Burman;
presenterat av Jan-Ola Burman
Sveriges Geologiska AB, Box 801, 951 28 Luleå

Den stora variationen i elementsammansättning i geologiska prover kombinerat med dessa provtypers fysiska och kemiska motståndskraft är några av skälen till varför analys av geoprover betraktas som svårt och tidskrävande. Kravet på stora volymer av billiga och fortfarande noggranna multielementanalyser inom exempelvis prospekteringsverksamheten gjorde det tidigt nödvändigt att ersätta klassiskt våtkemiska metoder med instrumentella. Kolorimetri, optisk emission med gnista, båge och plasma, atomabsorption och röntgenfluorescens (eng XRF) är de mest använda.

Vid SGU har genom åren ett flertal instrumentella analyssystem utvecklats, exempelvis tapemaskinen, IDES och automatiserade XRF-system samt även administrativa system anpassade för stora informationsmängder (LABBSYSTEMET).

Kraven på högre analysproduktion och samtidig förbättring av analyskvalitén gjorde det nödvändigt med en översyn av Philips-systemet. Genomgången av marknaden resulterade i en investering i två nya röntgenspektrometrar, Rigaku Simultix VI, som levererades under sommaren 1982. Under december 1982 startades analysproduktionen med det nya analyssystemet, inklusive de tidigare utvecklade robotenheterna för automatisk provväxling.

Kontroll av analysresultat

Det vanligaste sättet att undersöka ett analysssystems prestanda är att bestämma innehållet i redan väl kända prover, exempelvis internationellt bestämda standards. Vid certificering av sådana standards erbjuds som regel de större laboratorierna i världen att delta. Så sent som 1949 initierades tanken vid USGS att samma prov borde sändas till de mest respekterade laboratorierna för jämförande analys. Med viss diplomati konstaterar Schlecht (1) i

sin sammanfattning efter den första undersökningen "First results show that rock analyses are generally not as precise as has been assumed". Idag har fortfarande citatet från 1950 stor giltighet - större än vad många tror.

Bilisten som ser en polisbil i backspegeln kör ytterst sällan fortare än vad hastighetsbegränsningen stipulerar. Laboratoriet som deltar i certificering av prover, som ska bli standards, ansträngersig oftast maximalt för att erhålla så riktiga resultat som möjligt. Det är nästan alltid möjligt att analysera några få prover med högre säkerhet än vad man får under rutinmässig analys genom att använda personal- och tidsintensiva specialmetoder, som kanske enbart de mest erfarna analytikerna har kompetens att utföra. En viss analogi mellan bilisten och analytikern existerar. Om man vet att man övervakas så påverkas resultatet.

Trots att alla laboratorier säkerligen ansträngер sig hårt för att göra bra ifrån sig vid certificering av standards, så finner man fortfarande (1980) en betydande spridning i de analysresultat, som rapporteras vid certificering. I figur 1 representeras de individuella laboratoriernas resultat med ett streck för varje rapporterad huvudelementanalys. Figur 2 illustrerar situationen för W, Y, Zn och Zr i en granit, MA-N. Resultaten för dessa spårelement visar relativt stora spridningar - W (32-122 ppm), Y (0,38-35 ppm), Zn (104-315 ppm), Zr(4-150 ppm). Bokstavskoden beskriver analysmetoden och sifferkoden anger laboratoriets identitet. Det är tillnyktrande för såväl analytiker som användare av analysresultat att ta del av informationen från exempelvis Geostandards Newsletter (2) eller andra källor, som ställer samman analysdata från certificeringsförfaranden (3-5).

Resultat med SGAB's nya röntgenutrustning

Under en vecka i slutet av januari 1983 analyserades briketter av ett antal internationella standards en gång per dag (n=5) under rutinmässiga förhållanden. Medelvärden och spridning erhållna under dessa mätningar presenteras i den här rapporten. I figur 3 (Si,Al) och figur 4 (Zn,V) jämförs funna resultat med vår XRF med certifi-

cerade halter. För några standards jämförs även den analytiska spridningen som erhölls vid certificeringen (x-led) med det nya systemets spridningsprestanda (y-led). De nya röntgeninstrumentens stabilitet och reproducerbarhet är lätta att avläsa i figurerna 3 och 4. I tabell 1-3 visas såväl noggrannhten som reproducerbarheten (precisionen) för 30 grundämnen i tre av de åtta internationella bergartsstandards, som har analyserats. I tabellerna 4-6 sammanställs funna XRF-resultat (=medelvärden) med certificerade halter för alla åtta olika bergartsstandards. I tabell 7 och 8 presenteras utfallet av dubbelanalyserade prover, som är delade efter torkning och homogenisering. Duplikaten är rutinmässigt analyserade som olika prover utan att laboratoriet hade kännedom om testen. Såväl provprepareringen som analyssteget ingår således i testförfarandet. Resultaten presenteras med tillstånd av beställaren, John Ek.

Detektionsgränser

Vid kalibrering av ett röntgensystem med exempelvis enbart basalter så kommer detektionsgränsen för de flesta elementen att bli 1,5-5 gånger lägre än vad som erhålls när systemet används för rutinanalys av "normala" bergartsprover i vilka halterna av huvudelementen varierar inom vida gränser.

Genom att detaljstudera tabellerna 4-6 ser man snart att flertalet av de lägsta analyserade halterna enbart visar att provets halt ligger under detektionsgränsen. Inom intervallet noll (0) upp till detektionsgränsen kan vi slumpmässigt erhålla vilket resultat som helst, dvs att inom detta intervall saknar den utskrivna siffran någon information utöver att halten är lägre än vad analyssystemet klarar att upptäcka. Problemet med utsättande av detektionsgränser är huvudsakligen att de varierar som funktion av provets huvudelementsammansättning. Man kan välja att visa detektionsgränser som erhålls under mest gynnsamma förhållanden eller också väljer man att presentera resultat som svarar mot mer realistiska blandningar av geoprover.

Överskattning av analysprestanda med "försäljarvärden" är inte

ovanliga. Det finns många detaljer som kan diskuteras i tabellerna, koppar i tabell 5 kan bli ett exempel. Resultaten för SARM-1, SARM-3, SARM-6 och SY-3 indikerar att en detektionsgräns på 15 ppm är trolig med undantag för AN-G, som har en certificerad halt på 19 ppm och ger 39 ppm (+ 105%). Kan då detektionsgränsen 15 ppm försvaras? Ja, 15 ppm kan försvaras, men dock inte i alla prov. I uppskattningsvis 10-20% av proven så kommer analysprestanda att vara sämre än vad man normalt uppnår. AN-G är ett sådant fall. Cu-fallet visar dock tydligt att det inte finns något samband mellan certificerade och funna halter under 10-15 ppm, dvs att dessa resultat inte har någon signifikans.

Reproducerbarhet - precision

Begreppen precision (reproducerbarhet) och noggrannhet förväxlas ibland. Precisionen är ett mått på metodens förmåga att repitera ett resultat. Zr i SARM-3, tabell 3, läses med mycket hög precision 21 ± 1 ppm, dvs den relativa standarddeviationen ligger inom $\pm$ 5%. Noggrannheten är dock inte så imponerande; certificerad halt 50 ppm och funnen 21 ppm (-58%). Det är stor skillnad på detektionsgräns och förmågan att repitera analysresultat.

Slutsatser

Det nya XRF-systemet fungerar bra. Precisionen och noggrannheten är bättre än tidigare. I tabellerna 4 till 6 är flera av de angivna halterna under detektionsgränsen. Halter under den mest gynnsamma detektionsgränsen indikerar endast att resultatet ligger under analyssystemets känslighet, För många element ökar känsligheten betydligt när halterna ligger över 100 ppm.

Jämförelsen mellan XRF-systemets spridningsmått i relation till spridningen i resultaten som ligger till grund för certificeringen av internationella standardprover visar också det att det nya systemet ger bra resultat.

Referenser

1. Schlecht; U.S. Geological Survey Bull. 980, 71 pp., 1951

2. Govindaraju, K.; Report (1980) on three GIT-IWG rock reference samples: AN-G, BE-N, MA-N. Geostandards Newsletter, April 1980, vol. 4, 49-138.

3. Steele T.W., Wilsson A., Ellis P.J. och Radford A.J.; Trace element data (1966-1977) for the six NIMROC (SARM) reference samples. Geostandards Newsletter, April 1978, Vol. 2, 71-106.

4. Abbey S.,Meeds R.A. and Belanger P.G.; Reference samples of rocks - The search for 'best values'. Geostandards Newsletter, October 1979, Vol. 3, 121-134.

5. Steele T.W. och Hansen R.G.; Major element data (1966-1978) for six NIMROC (SARM) reference samples. Geostandards Newsletter, October 1979, Vol.3, 135-172.

Tabell 1

Repiterad analys vid 5 tillfällen under en vecka, SARM-1

Ämne	Halt	Cert	Medel	S-dev	Min	Max
Na_2O	%	3,4	3,2	0,03	3,1	3,2
MgO	%	0,1	0,1	0,001	0,1	0,1
Al_2O_3	%	12,1	11,7	0,02	11,7	11,7
SiO_2	%	76,7	76,2	0,06	76,1	76,3
P_2O_5	ppm	175	115	2	114	119
S	ppm	125	135	4	131	139
K_2O	%	5,0	5,0	0,02	5,0	5,1
CaO	%	0,8	0,8	0,004	0,8	0,8
TiO_2	%	0,1	0,1	0,001	0,1	0,1
V	ppm	2	8	1	7	9
Cr	ppm	12	17	1	15	18
MnO	%	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
Fe_2O_3	%	2,0	3,2	0,005	3,1	3,2
Co	ppm	6	10	1	8	11
Ni	ppm	8	15	1	14	17
Cu	ppm	12	20	2	19	23
Zn	ppm	50	52	0	51	52
Mo	ppm	<10	19	1	18	20
BaO	ppm	120	166	10	153	181
Pb	ppm	40	45	5	37	48
Th	ppm	52	79	5	74	85
U	ppm	15	37	12	16	45
Cl	ppm	600	275	4	269	280
As	ppm	-	39	2	37	43
Rb	ppm	325	321	2	319	324
Sr	ppm	10	18	0	17	18
Y	ppm	147	160	0	160	161
Zr	ppm	300	282	1	281	282
Nb	ppm	53	62	1	62	64
Sn	ppm	<10	48	9	40	58

Tabell 2

Repiterad analys vid 5 tillfällen under en vecka, SARM-3

Ämne	Halt	Cert	Medel	S-dev	Min	Max
Na_2O	%	8,4	8,4	0,09	8,33	8,55
MgO	%	0,3	0,3	0,01	0,2	0,3
Al_2O_3	%	13,6	15,0	0,02	15,0	15,0
SiO_2	%	52,4	55,5	0,09	55,4	55,6
P_2O_5	ppm	595	515	2	512	517
S	ppm	650	710	4	706	715
K_2O	%	5,5	5,8	0,02	5,8	5,8
CaO	%	3,2	3,2	0,01	3,2	3,2
TiO_2	%	0,5	0,5	0,001	0,5	0,5
V	ppm	81	85	3	79	87
Cr	ppm	10	13	2	9	15
MnO	%	0,8	0,8	0,01	0,8	0,8
Fe_2O_3	%	9,1	10,1	0,01	10,1	10,1
Co	ppm	<10	<10		<10	<10
Ni	ppm	11	<10		<10	<10
Cu	ppm	13	6	3	2	11
Zn	ppm	395	394	0	394	394
Mo	ppm	<10	22	8	18	36
BaO	ppm	450	578	12	567	597
Pb	ppm	43	61	8	48	66
Th	ppm	65	73	4	67	77
U	ppm	14	14	13	<10	23
Cl	ppm	1200	1193	4	1189	1199
As	ppm	-	24	3	22	30
Rb	ppm	190	200	1	199	202
Sr	ppm	4570	4523	7	4514	4527
Y	ppm	25	31	2	28	33
Zr	%	1,1	0,99	0,001	0,99	1,0
Nb	ppm	979	984	3	979	987
Sn	ppm	<10	26	8	18	36

Tabell 3

Repiterad analys vid 5 tillfällen under en vecka, SARM-6

Ämne	Halt	Cert	Medel	S-dev	Min	Max
Na_2O	%	<0,1	<0,1	0,01	<0,1	<0,1
MgO	%	43,5	43,8	0,08	43,8	43,9
Al_2O_3	%	0,3	0,3	0,01	0,3	0,3
SiO_2	%	39,0	38,8	0,07	38,7	38,8
P_2O_5	ppm	92	65	3	62	68
S	ppm	100	167	57	138	143
K_2O	%	<0,1	<0,1		<0,1	<0,1
CaO	%	0,3	0,3	0,01	0,3	0,3
TiO_2	%	<0,1	<0,1	0,001	<0,1	<0,1
V	ppm	40	57	1	56	57
Cr	ppm	2870	3249	24	3207	3265
MnO	%	0,2	0,2	0,002	0,2	0,2
Fe_2O_3	%	17,0	17,4	0,03	17,3	17,4
Co	ppm	208	186	8	173	193
Ni	ppm	2040	2022	9	2011	2033
Cu	ppm	10	15	1	14	16
Mo	ppm	10	8	1	7	9
BaO	ppm	10	<10		<10	17
Pb	ppm	<10	<10		<10	<10
Th	ppm	<5	6	4	3	11
U	ppm	1	15	6	5	19
Cl	ppm	400	411	2	409	414
As	ppm	-	21	2	19	22
Rb	ppm	<5	12	1	12	13
Sr	ppm	3	0	0	0	1
Y	ppm	-	2	1	1	3
Zr	ppm	50	21	1	20	22
Nb	ppm	4	10	1	9	11
Sn	ppm	<10	31	4	26	37

Tabell 4

Medelvärde av analyser utförda på samma brikett vid 5 olika tillfällen under en vecka i januari 1983

PROV		Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3
SARM-1	Cert	3,4	0,1	12,1	75,7	175	5,0	0,8	0,1	<0,1	2,0
	XRF	3,2	0,1	11,7	76,2	115	5,0	0,8	0,1	<0,1	3,2
SARM-3	Cert	8,4	0,3	13,6	52,4	595	5,5	3,2	0,5	0,8	9,1
	XRF	8,4	0,3	15,0	55,5	515	5,8	3,2	0,5	0,8	10,1
SARM-6	Cert	<0,1	43,5	0,3	39,0	92	<0,1	0,3	<0,1	0,2	17,0
	XRF	<0,1	43,8	0,3	38,8	65	<0,1	0,3	<0,1	0,2	17,4
SY-2	Cert	4,3	2,7	12,1	60,1	4300	4,5	8,0	0,1	0,3	6,3
	XRF	4,4	2,7	12,5	61,6	4500	4,7	7,8	0,1	0,3	6,5
SY-3	Cert	4,2	2,7	11,8	59,7	5400	4,2	8,3	0,2	0,3	6,4
	XRF	4,2	2,6	12,0	61,1	5360	4,4	8,0	0,1	0,3	6,6
BE-N	Cert	3,2	13,2	10,1	38,2	10500	1,4	13,9	2,6	0,2	12,8
	XRF	3,8	15,2	11,2	40,4	11700	1,5	13,7	2,6	0,2	12,1
BR	Cert	3,1	13,3	10,2	38,2	10400	1,4	13,7	2,6	0,2	12,9
	XRF	3,7	14,8	11,4	40,5	11800	1,5	13,6	2,6	0,2	12,3
AN-G	Cert	1,6	1,8	29,8	46,3	100	0,1	15,9	0,2	<0,1	3,4
	XRF	1,5	2,1	28,7	47,9	300	0,1	16,1	0,2	<0,1	3,7

Tabell 5

Medelvärde av analyser utförda på samma brikett vid 5 olika tillfällen under en vecka i januari 1983

PROV		S	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Ba	Pb
SARM-1	Cert	125	2	12	6	8	12	50	<10	120	40
	XRF	135	8	17	10	15	20	52	19	166	45
SARM-3	Cert	650	81	10	<10	11	13	395	<10	450	43
	XRF	710	85	13			6	394	22	578	61
SARM-6	Cert	100	40	2870	208	2040	10	90	10	10	<10
	XRF	170	57	3250	186	2020	15	90	8		2
SY-2	Cert	110	52	12	11	10	5	250	1	460	80
	XRF	170	43	4	14	9	1	253	13	497	74
SY-3	Cert	500	51	14	12	11	16	240	3	430	130
	XRF	470	53	10	19	9	16	233	27	488	127
BE-N	Cert	300	235	360	61	267	72	120		1025	4
	XRF	440	233	377	52	306	89	116		1140	1
BR	Cert	390	235	380	50	260	72	150	3	1050	8
	XRF	405	238	354	48	278	93	153		1210	0
AN-G	Cert	140	70	50	25	35	19	20		34	2
	XRF	100	64	63	5	54	39	25	8	135	18

Tabell 6

Medelvärde av analyser utförda på samma brikett vid 5 olika tillfällen under en vecka i januari 1983

PROV		Th	U	Cl	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sn	Rest
SARM-1	Cert	52	15	600		325	10	147	300	53	<10	
	XRF	79	37	275	39	321	18	160	282	62	48	<0,01
SARM-3	Cert	65	14	1200		190	4570	25	11030	979	<10	
	XRF	73	14	1190	24	200	4520	31	10000	984	26	0,03
SARM-6	Cert	<5	1	400		<5	3		50	4	<10	
	XRF	6	15	411	21	12	0	2	21	10	31	0,15
SY-2	Cert	380	290	130	18	220	275	130	280	27	4	
	XRF	399	304	496	19	227	281	137	342	55	32	0,03
SY-3	Cert	990	650	140	20	210	306	740	320	145	6	
	XRF	957	634	195	4	215	294	645	403	224	22	0,95
BE-N	Cert	11	2	300			1370	30	265	100		
	XRF	19	23	391	20	42	1320	7	432	110	36	0,06
BR	Cert	12	3	370		47	1320	30	250	100	8	
	XRF	18	19	639	20	47	1320	6	432	113	52	0,05
AN-G	Cert			300		1	76	8	15	2		
	XRF	29	31	223	23	21	90	36	86	25	76	0,01

Tabell 7

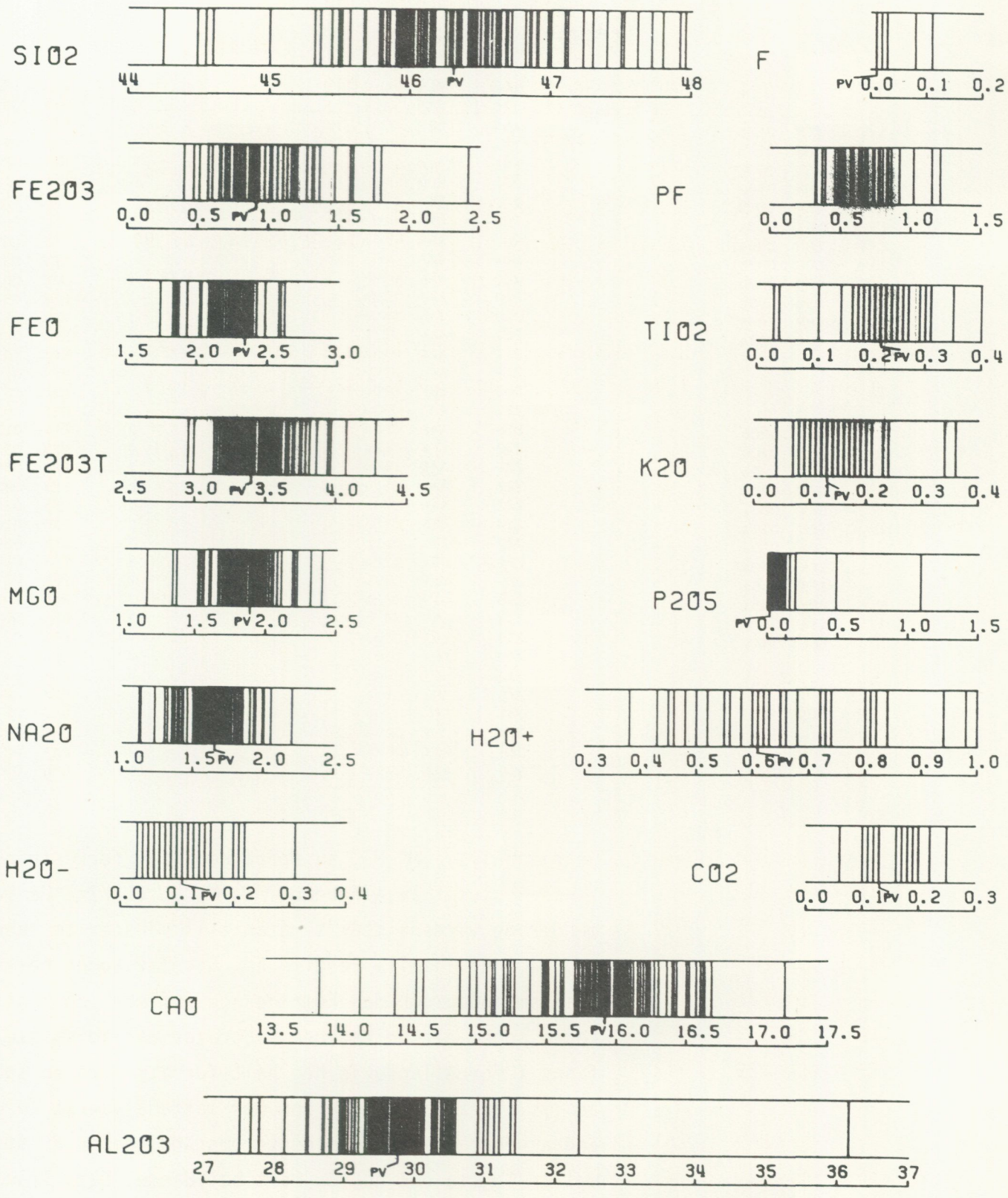
Analyser av dubbelprov (Geokemisk dokumentation, SGU)

Provtyp	Bäckmossa		Bäckmossa		Bäckmossa		Bäckmossa		Bäckmossa	
8211	003	042	005	043	006	044	010	045	015	047
Na_2O %	1.41	1.43	0.81	0.81	0.51	0.52	0.88	0.88	1.92	1.95
HgO %	1.31	1.23	1.15	1.15	1.70	1.66	1.36	1.42	1.37	1.33
Al_2O_3%	11.11	10.80	4.42	4.42	3.09	3.18	8.88	9.09	7.75	7.75
SiO_2 %	55.66	54.59	82.02	81.48	78.81	79.16	66.56	65.59	66.34	66.37
P_2O_5 %	1.01	0.97	1.56	1.55	2.13	2.07	1.74	1.84	0.46	0.46
S %	0.18	0.18	0.21	0.18	0.73	0.36	0.43	0.23	0.36	0.27
K_2O %	3.15	2.97	2.71	2.73	4.09	3.97	4.83	4.84	3.25	3.27
CaO %	3.19	3.17	2.71	2.78	4.75	4.74	4.65	4.70	3.71	3.66
TiO_2 %	0.61	0.60	0.36	0.37	0.15	0.15	0.41	0.43	0.31	0.32
V ppm	61	55	58	58	20	22	24	21	48	47
Cr ppm	184	162	177	201	341	365	201	193	587	656
MnO %	0.27	0.26	0.12	0.12	0.14	0.14	0.32	0.33	0.11	0.11
Fe_2O_3%	3.98	3.87	4.74	4.81	4.97	4.99	1.51	1.47	2.42	2.43
Co ppm	17	14	15	17	15	17	<10	<10	<10	<10
Ni ppm	49	49	35	44	42	44	40	34	48	68
Cu ppm	31	25	36	35	45	46	16	19	44	43
Zn ppm	251	237	55	57	153	151	83	84	63	61
Mo ppm	<20	<20	<20	<20	31	29	<20	<20	26	27
BaO ppm	699	700	432	430	979	966	607	622	621	621
W ppm	40	37	<20	<20	46	56	55	58	33	37
Pb ppm	49	44	51	58	54	62	76	74	57	55
Th ppm	28	25	<10	<10	<10	<10	27	26	14	14
U ppm	30	13	<10	<10	65	54	74	73	<10	<10
Cl ppm	515	341	1451	1830	3073	5065	2350	2358	1306	1224
As ppm	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Rb ppm	144	139	122	124	125	162	240	240	153	149
Sr ppm	207	206	236	240	269	267	255	255	250	250
Y ppm	68	54	114	119	263	240	103	103	78	77
Zr ppm	448	427	191	198	97	98	239	243	254	274
Nb ppm	18	18	<10	11	<10	<10	20	26	<10	<10
Sn ppm	<10	<10	<10	131	109	160	<10	<10	<10	123

Tabell 8

Analyser av dubbelprov (Geokemisk dokumentation, SGU)

Provtyp	Humus		Bäcktorv		Bäcktorv		Bäcktorv	
8211	024	046	034	048	036	049	037	050
Na_2O %	0.92	0.92	1.97	1.92	0.26	0.24	1.07	0.86
HgO %	0.53	0.52	1.33	1.35	1.60	1.53	0.85	0.78
Al_2O_3%	8.23	7.73	9.16	8.85	3.58	3.45	6.56	5.89
SiO_2 %	76.05	70.25	57.30	56.01	14.52	14.06	81.42	78.94
P_2O_5 %	0.63	0.64	0.70	0.83	1.25	1.21	0.85	0.81
S %	0.19	0.18	0.20	0.26	4.35	4.13	0.22	0.19
K_2O %	3.34	3.12	3.54	3.51	1.01	1.01	1.92	1.76
CaO %	2.04	1.94	1.97	2.09	33.13	32.44	2.22	1.79
TiO_2 %	0.36	0.33	0.37	0.36	0.19	0.19	0.35	0.32
V ppm	40	38	46	43	<20	<20	36	34
Cr ppm	506	535	415	393	94	147	292	207
MnO %	0.13	0.12	<0.1	<0.1	1.84	1.82	<0.1	<0.1
Fe_2O_3%	2.45	2.07	4.02	4.25	7.50	7.35	3.28	2.94
Co ppm	<10	<10	12	14	22	23	<10	<10
Ni ppm	34	46	30	28	129	127	37	32
Cu ppm	18	17	<10	<10	94	92	41	41
Zn ppm	224	206	67	70	251	251	83	77
Mo ppm	23	23	<20	<20	20	<20	23	26
BaO ppm	797	754	550	534	399	389	696	658
W ppm	38	51	31	34	73	67	35	36
Pb ppm	132	116	42	43	47	61	63	61
Th ppm	20	18	22	21	47	61	16	20
U ppm	<10	<10	<10	10	<10	<10	95	98
Cl ppm	245	305	401	410	1919	1850	288	160
As ppm	22	22	<20	<20	<20	<20	21	<20
Rb ppm	182	178	156	154	299	333	129	124
Sr ppm	119	112	247	248	895	875	201	184
Y ppm	43	35	39	31	<10	<10	304	282
Zr ppm	269	251	259	268	135	133	216	182
Nb ppm	14	14	17	15	<10	10	15	<10
Sn ppm	126	147	<10	<10	195	188	132	214



Figur 1. Resultat vid analys av huvudelementen i en anortosit (AN-G). För varje element är varje individuellt resultat presenterat som en linje. De tjockare linjerna representerar sammanfallande linjer och de tunna är isolerade värden. PV (Proposed Value) är det rekommenderade värdet. Data från (1).

W

N = 14

70		
	32	DSM 020b
	54	EMN 011a
	55	CCK 050b
	56	EMN 052a
	58	ASP 050c
	61	EMN 058a
	67	CCK 028a
	73	EFX 013a
	73	EMN 096a
	75	CCK 047b
	79	DSG 092b
	80	DSG 099c
	92	EMN 103a
	122	DSG 003a

Y

N = 12

1		
	0.38	DSM 020b
	1	ASP 070a
	1	BSP 062b
	1.6	BFX 022a
	5	EFX 066a
	10	EFX 016a
	17	EFX 023a
	21	EFX 059a
	25	EFX 095a
	26	EFX 055a
	35	EFX 017a
	35	EFX 084a

Yb

	0.6	DSG 010c

Zn

N = 43

220		
	104	DSG 036a
	140	DSM 020b
	180	DSG 031g
	181	AAA 082a
	196	AAA 061a
	200	EMN 096a
	202	EFX 014a
	202	DSG 003a
	203	AAA 056a
	204	AAA 083a
	206	AAA 010b
	210	AAA 103a
	210	BAA 050a
	211	AAA 021a
	211	AAA 013a
	212	AAA 047b
	216	ASP 070a
	217	AAA 005a
	218	AAA 081a
	218	EFX 062a
	220	AME 104a
	222	AAA 051a
	222	AAA 074a
	224	EFX 095a
	227	EFX 051b
	229	BFX 022a
	229	DSP 079a
	229	AAA 092b
	230	DSP 047b
	233	EFX 033a
	240	EFX 038a
	242	EFX 074b
	245	EFX 016a
	245	EFX 076a
	247	EFX 023a
	248	EFX 087a
	250	AAA 079b

Zn ...

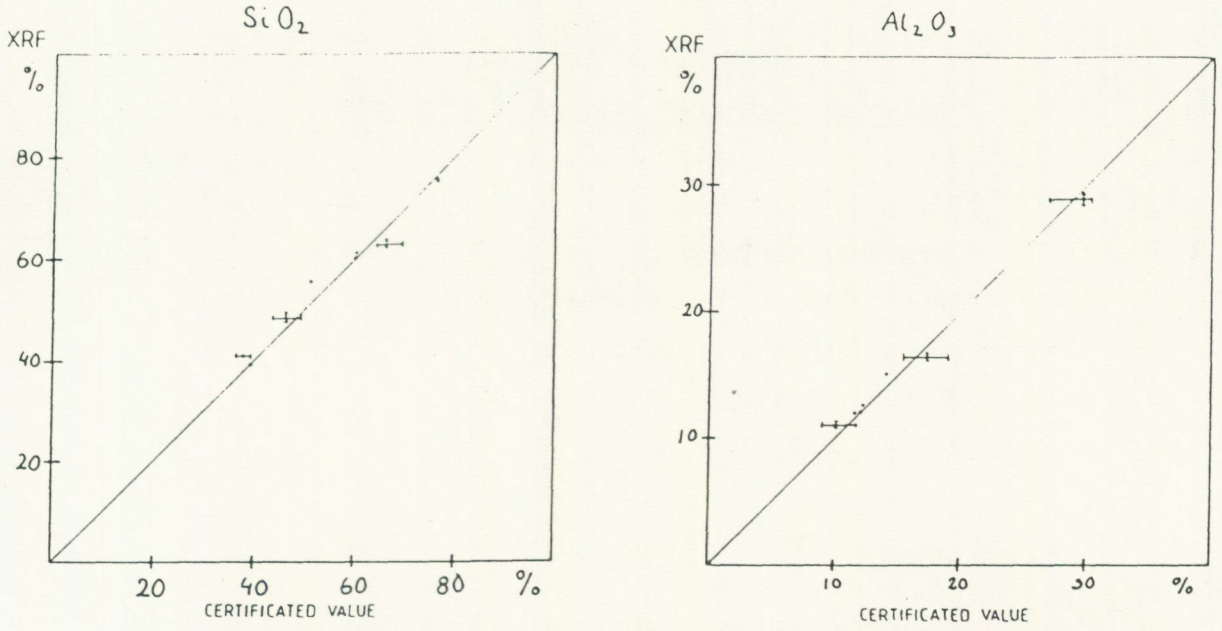
	250	BFX 072a
	250	EFX 055a
	251	EFX 084a
	262	AAA 094a
	306	EFX 021a
	315	EMN 011a

Zr

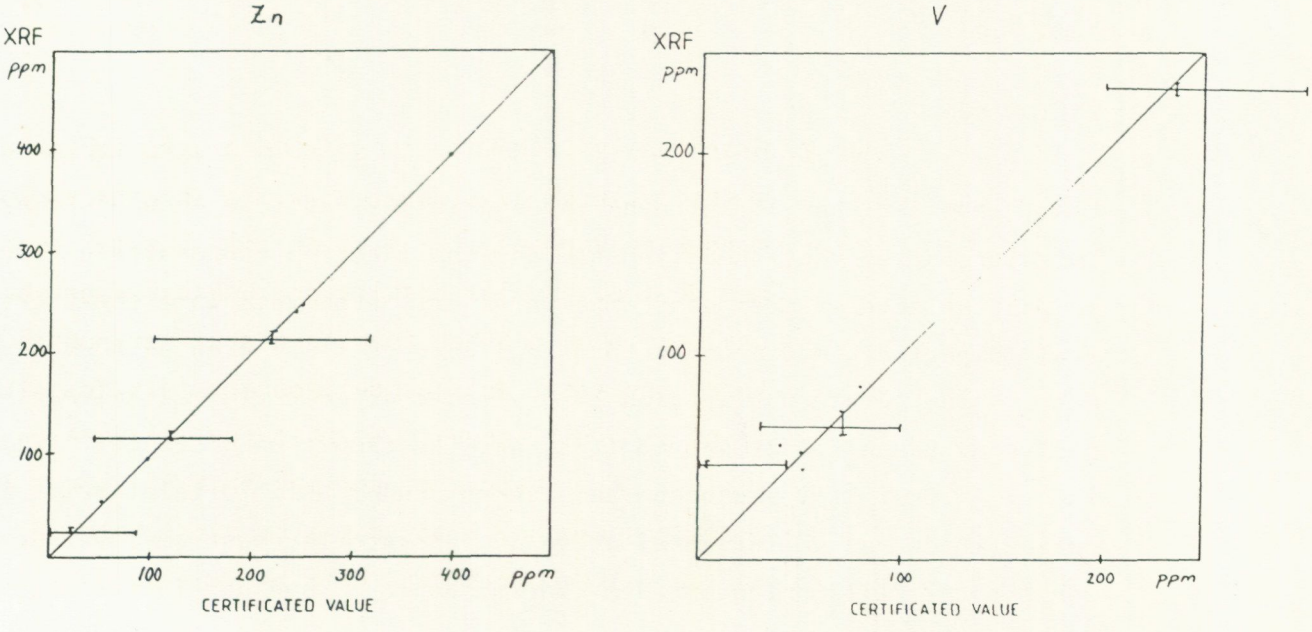
N = 28

27		
	4	EFX 033b
	12	DSG 003a
	12	EFX 062a
	13	EFX 051b
	15	EFX 040b
	16	EFX 067a
	18	EFX 016a
	19	DSG 031g
	22	EFX 095a
	23	EFX 013a
	23	EFX 023a
	23	EFX 038a
	26	EFX 087a
	26	EFX 025a
	27	DSM 020b
	29	EFX 059a
	30.5	EFX 017a
	31	EFX 032a
	33	BSP 101a
	33	EFX 066a
	40	EFX 076a
	42	EFX 014a
	42	EFX 043a
	49	BFX 022a
	53	DSG 094a
	55	DSG 099c
	75	AAA 021a
	150	EMN 096a

Figur 2. Granitanalys, (MA-N), av spårämnen vars förkortningar finns i slutet av alfabetet; W, Y, Zn och Zr. De rekommenderade värdena står i rutan till vänster om tabellen med de individuella resultaten. Bokstavskoden beskriver analysmetoden och den kombinerade siffer- och bokstavskoden anger det deltagande laboratoriets idientitet. Zn finns i förhållandevis hög halt för att vara en spårämnesanalys. Zn är betraktat som mer lättanalyserat än många andra grundämnen. Trots dessa omständigheter är spridningen mellan lägsta och högsta halt betydande. Data från (1).



Figur 3. Jämförelse mellan certificerade och funna halter för SiO_2 och Al_2O_3. Staplarna i x-led illustrerar spridningen i koncentration vid certificeringen och staplarna i y-led illustrerar spridningen vid XRF-analysen. De punkter som saknar staplar är internationella standards vars källdata vi för närvarande saknar.



Figur 4. Spårämnesanalys av Zn och V. Övrig figurförklaring, se figurtexten ovan, figur 3.

Geokemisk elementanalys med PIXE-metoden.

Lars-Eric Carlsson
Institutionen för kärnfysik
Lunds Tekniska Högskola
Sölvegatan 14
223 62 LUND

SAMMANFATTNING

Vid samtidig detektering av röntgen- och gammastrålning från prover som bestrålas med 2.5 MeV:s protoner från en partikelaccelerator kan element med atomnummer 3,5,9,11-92 bestämmas kvantitativt. Tillämpat på bergartsanalyser innebär detta att alla huvudelement och många spårelement kan bestämmas. Med en bestrålningstid av 3-5 min blir den lägsta detekterbara halten för många spårelement mellan 2 och 10 ppm. PIXE-metoden är en absolut metod och har för tyngre element mycket noggranna matriskorrektioner, vilket kombinerat med den bakgrundsinformation som erhålls med energidispersiva detektorer gör att metoden är mycket tillförlitlig ända ner till de lägst detekterbara spårelementhalterna. Förutom den osäkerhet som erhålls från ren pulsstatistik (0.3 - 30 %) har metoden en precision på 1.0 - 1.5 % (en standardavvikelse). Noggrannheten hos PIXE-metoden är för närvarande bättre än ca 5 %.

INLEDNING

PIXE, som är en förkortning av engelskans Particle Induced X-Ray Emission, är en röntgenanalysmetod där man låter en protonstråle från en partikelaccelerator åstadkomma vakanser i atomernas inre elektronskal. Experiment med metoden började i Lund de sista åren på 60-talet och i en första publikation 1970 visades att det vid multielementanalys av tunna folier var möjligt att bestämma mängder ner till 10^{-12} g (ref 1). Metoden har sedan under hela 70-talet vuxit i omfång, både vad gäller antal utövande laboratorier runt om i världen och i antal tillämpningsområden. Verksamheten i Lund har inriktats på föjande områden:

1/ Analys av luftföroreningar både från utomhus- och arbetsmiljöer (ref 2 och 3).

2/ Provpreparering och analys av olika typer av biologiska material (ref 4).

3/ Förkoncentreringsmetoder för analys av mycket låga elementhalter i vatten (ref 5).

4/ Analys av huvud- och spårelement i geologiska material (ref 6 och 7).

5/ Analyser med protonmikrosond, där en protonstråle med en diameter på mellan 5 och 50 μm används för att bl a bestämma gradienter i främst biologiska och mineralogiska prover (ref 8 och 9).

I den följande framställningen kommer främst metodens egenskaper vid analys av bricketterat geologiskt material att presenteras.

METODBESKRIVNING

När en protonstråle med en energi på några MeV växelverkar med materia uppstår förutom karakteristisk röntgenstrålning en mängd olika reaktioner som kan användas för kvantitativ analys (figur 1).

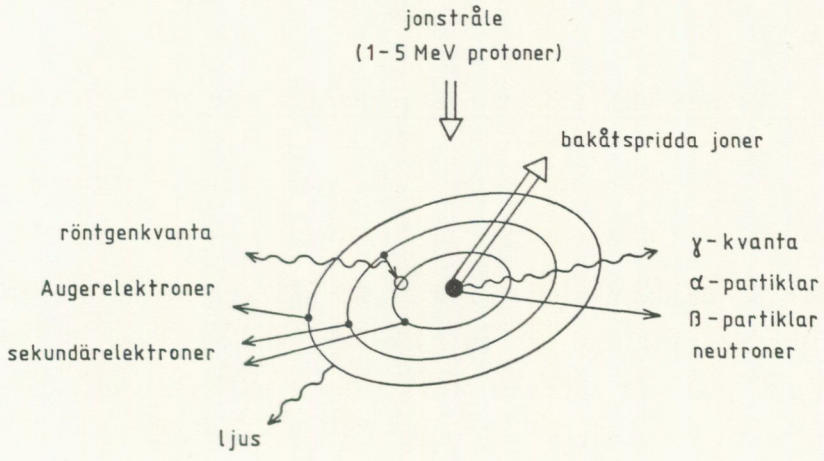


Fig. 1. Olika typer av växelverkan mellan en jonstråle och materia.

Detektion av den karakteristiska röntgenstrålningen ger de lägsta detektionsgränserna och analys av flest element. Analys av gammastrålningen från kärnreaktioner (ofta kallat PIGE, Particle Induced Gamma-Ray Emission) är ett attraktivt komplement till röntgenanalysen. Gammastrålningen induceras lättast i låg-Z element vilka inte kan bestämmas på sin röntgenstrålning. Denna simultana PIXE-PIGE analys möjliggör att alla element med atomnummer Z= 3,5,9,11-92 kan bestämmas med en kort bestrålning.

En principiell skiss över den uppställning som används för simultan röntgen- och gammaanalys i Lund ses i figur 2.

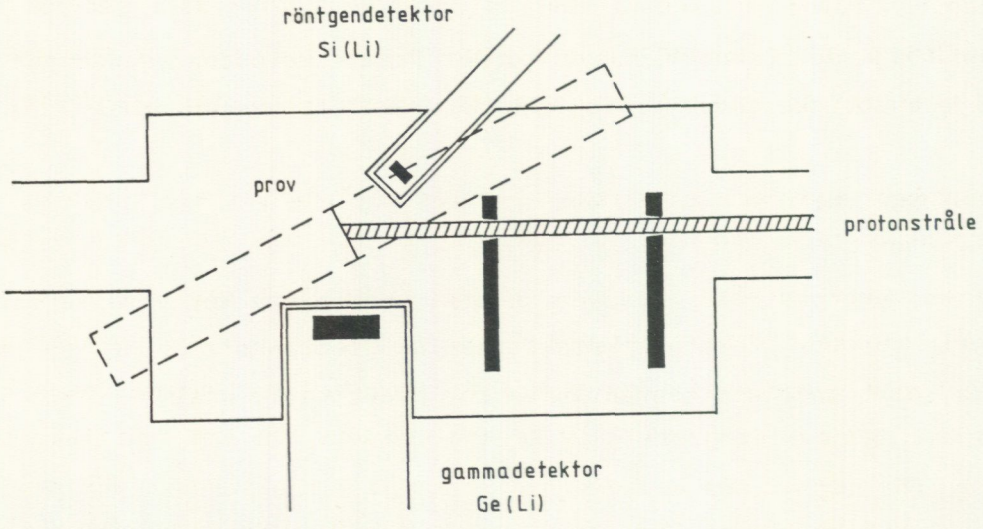


Fig. 2. Principskiss över analyskammare för PIXE-PIGE analys.

I en vanlig 50 mm diaram monteras en Al-hållare på vilken en brickett med en diameter på 15 mm och en tjocklek på ca 1.5 mm limmas fast. Ett magasin med 40 prover förs in i kammaren som anslutes till acceleratorns vakuumsystem. Diametern på protonstrålen kan varieras från 1 till 8 mm. Till röntgen- och gammamätningen används energidispersiva halvledarspektrometrar av Si(Li)- respektive Ge(Li)-typ.

De största fördelarna med den energidispersiva röntgendetektorn är att man får en sann multielementbestämning (en halt eller en minsta möjliga halt kan bestämmas för alla tyngre element) samtidigt som man

har en stor rymdvinkel och därmed effektiv detektering av röntgenstrålningen. Nackdelar är dess begränsade upplösningsförmåga, som gör att linjer från olika ämnen kan interferera med varandra och att detektorns effektiva räknehastighet är begränsad till ca 3000 pulser/sekund. Vid höga halter av tyngre element uppnås den maximala räknehastigeheten redan med en relativt låg protonintensitet, vilket försämrar metodens känslighet.

KVANTIFIERING

PIXE-metoden är liksom många andra energidispersiva röntgenmetoder en absolut metod, vilket innebär att standardprover inte behövs för att kalibrera varje elements känslighet utan endast för att bestämma och kontrollera de fysikaliska parametrar som behövs för kvantifieringen.

Allmängiltiga semiempiriska formler används för att räkna ut sannolikheten för produktion av röntgenstrålning (ref 10). För att möjliggöra kvantifiering av ett visst element krävs också kunskap om detektoreffektivitet, nettoytan för en röntgenlinje elementet har och det antal protoner som träffat provet. Protonladdningen bestäms normalt genom integrering av protonströmmen. De semiempiriska formler som för närvarande används för att ange sannolikheten för produktion av röntgenstrålning för givna proton- och röntgenenergier har en noggrannhet som är bättre än ca 5 % för K-skals röntgenenergier mellan 1.5 och 35 keV. För tyngre element ($Z > 56$) som detekteras på strålning från L-skalsvakanser är noggrannheten sannolikt något sämre.

För tjocka prover där protonerna går från sin initialenergi på 2.5 MeV vid ytan till noll-energi på ca 50 µm djup försämras denna noggrannhet något p g a osäkerheten i de matriskorrektionar som måste göras. För att förbättra noggrannheten så kan man, i stället för den absolut-kalibrering som kan göras med de tidigare nämnda generella formlerna, kalibrera mot kända prover, vilka lämpligen då har en matrissammansättning som liknar den typ av prover man vill analysera. En sådan kalibrering är en fördel för lättare element där utbytet av röntgenstrålning kraftigt beror av absorptionstvärsnittet. De

systematiska fel som kan uppstå p g a den osäkerhet som finns i absorptionstvärsnittens absoluta nivå (i tabellverk ofta angiven till 5 - 10 %) minskar kraftigt om kalibreringsproven har en sammansättning som ungefärligen överensstämmer med de prov man önskar bestämma. Vid analys av de tyngre elementen används PIXE-metodens absoluta egenskaper och även element som aldrig tidigare analyserats kan bestämmas med stor noggrannhet.

Ett exempel på ett PIXE-spektrum ses i figur 3. Provet är en internationell standard (USGS AGV-1) och man ser att både huvudelement och många spårelement kan bestämmas. Detta spektrum har insamlats under en bestrålningstid av 4 minuter. För att minska den mycket intensiva strålningen från huvudelementen (Z= 13-26) används ett filter som absorberar denna relativt lågenergetiska strålning. Filtret är försett med ett litet hål som gör att man ändå får igenom signaler från dessa lättare element. Denna hålabsorbator minskar intensiteten från dessa med en faktor 1500 till 500 och medger att proven kan bestrålas med en så hög protonintensitet att känsligheten för tyngre element (Z > 26) och för den samtidiga gammaanalysen kraftigt höjs.

I figur 3 utgör punkterna det insamlade röntgenspektrat medan linjerna är den anpassning som gjorts med det helautomatiska datorprogrammet HEX, som utvecklats i samarbete med PIXE-gruppen vid Florida State University (ref 11). Detta program gör en icke-linjär minsta-kvadratanpassning med upp till 50 parametrar, fördelade på 35 element och 12 parametrar för anpassning av bakgrunden. Ett bibliotek med plats för mer än 250 röntgenlinjer används. Programmet korrigerar för toppar uppkomna på grund av detektoreffekter (Si-escape och pile-up). Denna typ av program kräver att man använder en relativt stor dator, men ger i gengäld en högt automatiserad utvärdering, som klarar komplexa spektra och är lämplig för stora provserier. I det spektrum som erhålls från Ge(Li)-detektorn (figur 4) är topparna klart separerade och endast ett enkelt datorprogram behövs för att bestämma nettoytorna.

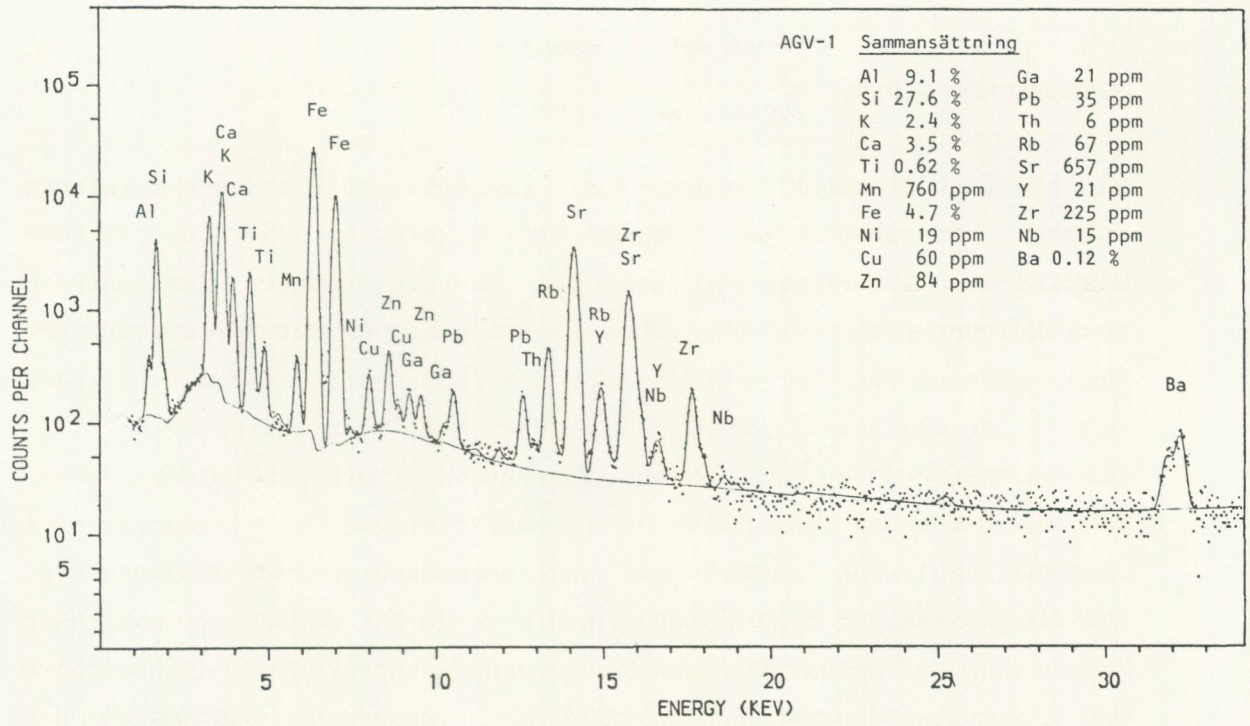


Fig. 3. Ett PIXE-spektrum av USGS-standarden AGV-1.

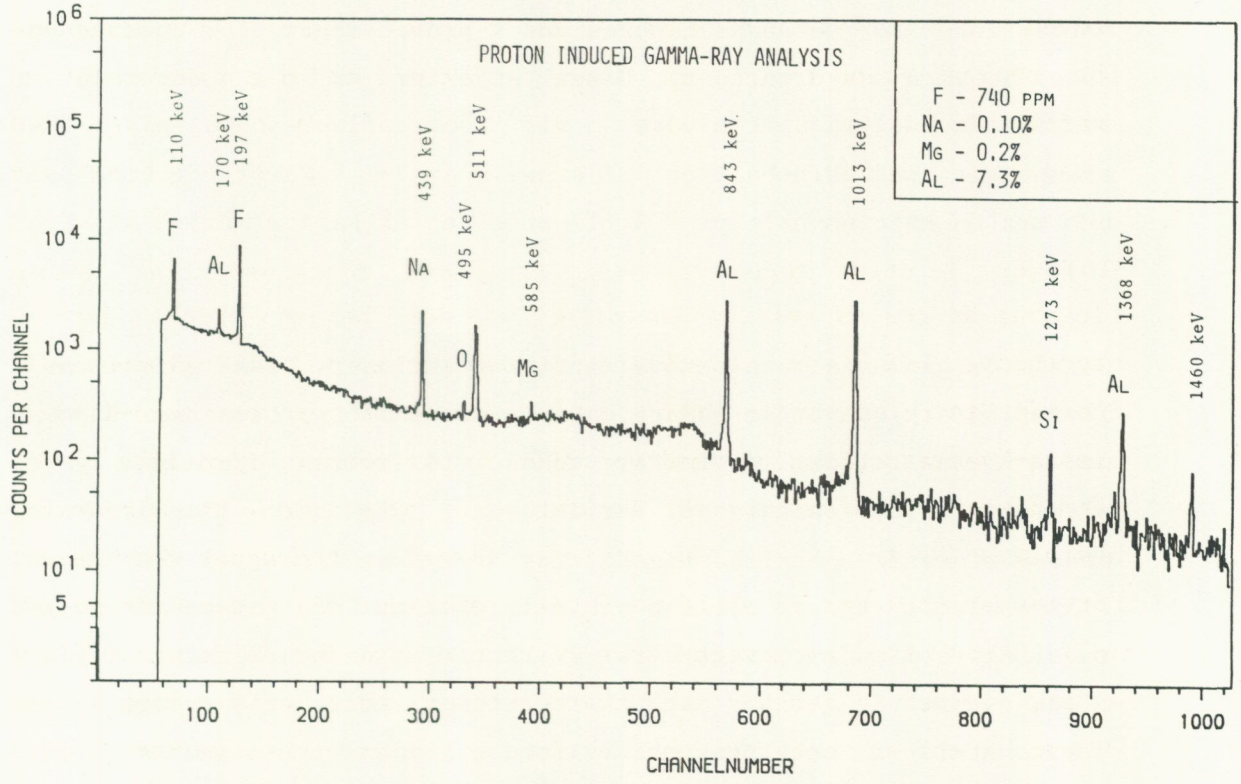


Fig. 4. Gammaspektrum insamlat med Ge(Li)-detektor under ca 4 min.

MATRISKORREKTIONER

Vid kvantifieringen krävs att hänsyn tas till att röntgenproduktionen minskar när protonerna bromsas upp i provet och att röntgenstrålningen absorberas på sin väg ut ur provet. Dessa matriskorrektioner görs med hjälp av tabellerade värden för dessa storheter (ref 12 och 13). Detta kallas för den fundamentala parametermetoden och är det vanligaste sättet att utföra matriskorrektion vid PIXE-analys. Proceduren vid denna korrektion är att preliminära halter räknas ut för en ansatt matrissammansättning. De på detta sätt bestämda halterna används nu som sammansättning i en ny beräkning. Vid bergartsprover fyller man på med syre så att matrisens totalhalt blir 100 %. Denna itererande procedur konvergerar snabbt (3-8 iterationer). Då praktiskt taget alla huvudelement bestäms i den kombinerade PIXE-PIGE analysen behövs ingen förkunskap om provets sammansättning och initialmatrisen kan väljas godtyckligt.

Korrektioner för sekundär fluorescens i provet ingår för närvarande inte i våra datorrutiner. Dessa effekter är p g a det relativt begränsade analysdjupet mindre än vid röntgenfluorescensanalys. Med exempelvis en järn-halt på 7 % erhålls en 3-3.5 % för hög krom-halt och med en kalcium-halt på 7 % bli effekten på kalium 2.5-3 % (ref 14).

Också för gammaanalysen behövs matriskorrektioner. Dessa görs i varje iteration och utnyttjar endast data om hur snabbt protonerna bromsas ned. Denna effekt dominerar också vid korrektioner på tyngre elementen i röntgenanalysen. Variationen i protonernas nedbromsning med varierande matrissammansättning är mycket liten, vilket gör att PIXE-analys av tyngre element och alla element från gammaanalysen ger resultat som endast svagt beror av matrisens sammansättning. I figur 5 ses exempelvis att om matriskorrektioner görs med antagande av kvartsmatris i ett prov med hälften kol och hälften kvarts eller i ett prov med hälften pyrit och hälften kvarts blir felet i matriskorrektionen mindre än 30 % för $Z > 20$. Detta är ett fel som är upp till 10 ggr mindre än motsvarande för röntgenfluorescensanalys.

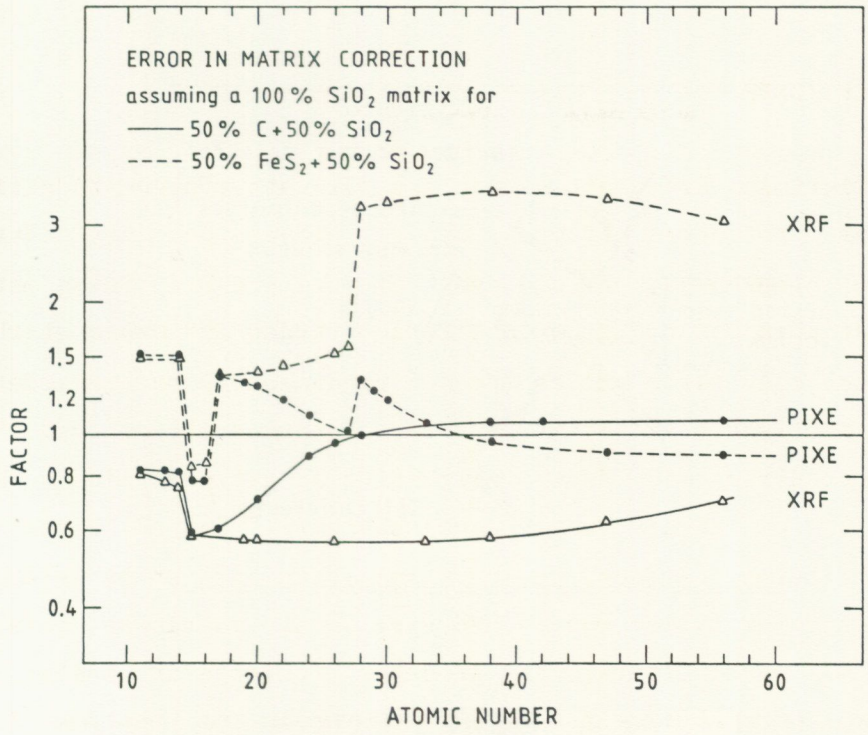


Fig. 5. Analysfel p g a felaktiga matriskorrektioner vid PIXE-analys jämfört med motsvarande för röntgenfluorescensanalys (XRF).

BORRKÄRNSCANNING

Dessa för PIXE-PIGE metoden så fördelaktiga egenskaper vad gäller matriskorrektioner, gör att analyser av heterogena prover kan ge relativt goda resultat. En typ av heterogena prov som har analyserats är opreparerade borrkärnor (ref 15). Vid denna typ av analys bestrålas proven i luft. Detta kan realiseras genom att protonerna får lämna acceleratorns vakuumsystem genom ett tunt plastfolie. Protonströmmen går inte att mäta vid bestrålning i atmosfärstryck, men genom att utnyttja att en liten del av protonerna sprids i utgångsfolien kan en enkel mätning av dessa användas som mått på protonintensiteten (se figur 6). Även vid analys i luft kan de lättaste elementen bestämmas med gammaanalys. Vid röntgenfluorescens-analys i luft kan däremot inga element lättare än aluminium eller kisel bestämmas.

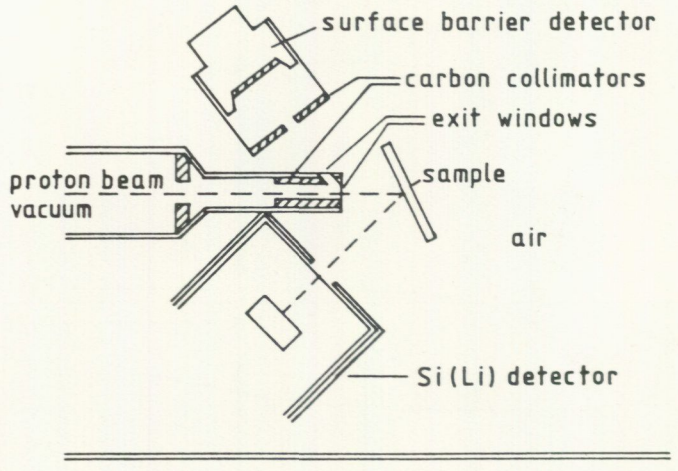


Fig. 6. Principskiss över en kammare för PIXE-analys vid atmosfärstryck.

I ett pågående projekt byggs nu en demonstrationsanläggning där en automatisk, scannande analys direkt på borrkärnor liggande i sina förvaringslådor ska kunna utföras. Vid denna anläggning ska scannande analyser göras också med olika energidispersiva röntgenfluorescensmetoder.

METODENS PRESTANDA

De detektionsgränser man får för AGV-1 provet ses i figur 7. Många spårelement kan detekteras i halter under 10 ppm. Detektionsgränserna är här beräknade som 3 ggr bakgrundsnivåns standardavvikelse. Bakgrunden räknas här i ett intervall på 2 ggr toppens halvvärdesbredd. I figuren ses också detektionsgränser för de lättare ämnen som kan bestämmas i den samtidiga gammaanalysen. I figuren saknas elementen bor, beryllium och syre vilka också är möjliga att bestämma. Detektionsgränserna för dessa kan uppskattas till ungefärligen 100 ppm, 6 % respektive 30 %.

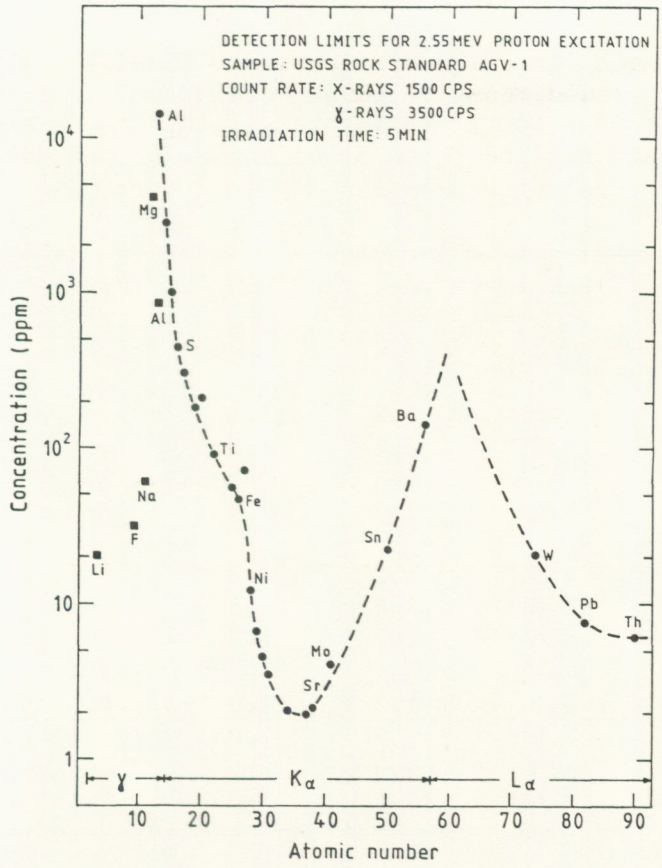


Fig. 7. Detektionsgränser för AGV-1. De fyllda cirklarna gäller PIXE-analysen och de fyllda fyrkanterna PIGE-analysen.

En uppskattning av PIXE-PIGE metodens noggrannhet och precision har tidigare publicerats (ref 6). För att ytterligare utvärdera noggrannhet och precision i analysen har ca 90 analyser gjorts på 5 st internationella standards och en standard av kvarts (1 brickett av varje). Dessutom har analyser gjorts på 10 st bricketter av en intern standard, SG, tillverkad och kalibrerad av Z. Solyom och I. Johansson på analyslaboratoriet vid geologiska institutionen i Lund.

I tabell 1 anges precisionen för PIXE-PIGE analys som en standardavvikelse av antalet pulser i toppen. Analyserna har utförts under 5 st 2-dagars perioder från oktober -81 till april -82.

TABELL 1: Precisionen för olika element vid PIXE-PIGE analys uttryckt som en standardavvikelse av antalet pulser i toppen vid n analyser av 6 st referensprover. Alla element med mer än ca 5000 pulser i nettoyta är medtagna. Standardavvikelsen är angiven i relativprocent.

	AGV-1	GSP-1	G-2	GM	DTS-1	SiO_2
n =	19	12	12	10	17	18
F	6.1	3.3	5.2	5.4	-	-
Na	3.7	2.9	3.6	2.5	-	-
Mg	-	-	-	-	3.1	-
Al	3.6	3.6	5.7	2.2	-	-
Si	6.1	4.8	4.2	4.8	8.1	4.9
K	1.6	1.8	1.8	1.4	-	-
Ca	1.3	1.6	1.7	1.7	-	-
Ti	2.0	-	-	-	Cr: 2.0	-
Fe	1.3	1.2	1.3	1.0	1.0	-
Rb	-	1.6	1.7	1.0	Ni: 1.6	W: 1.3
Sr	1.8	2.3	2.3	-	-	-
Zr	2.2	7.6	11.6	-	-	-

För de lättare elementen, som är bestämda med gammaanalys är spridningen högre än för de röntgenanalyserade. Av de senare har kisel och zirkonium klart förhöjd spridning.

De resultat som erhölls vid analys av de 10 SG-proven framgår av tabell 2. SG-provens kornstorlek var mindre än 30 µm. Vid kvantifiering av element med $Z < 27$ har kalibrering gjorts mot de ovan använda referensproverna. För de tyngre elementen utnyttjas metodens absoluta egenskaper.

Vid jämförelse av spridningen i värdena mellan tabell 1 och tabell 2 ser man att korttidsvariationen för kisel på SG-proven (1.1 %) inte är större än för övriga element. Genom att kalibrera kisels känslighet regelbundet kan precisionen i kisel-analysen förbättras.

TABELL 2: Medelvärden (mv) och standardavvikelser (sa) för halter i 10 st SG-prover bestämda med PIXE-PIGE metoden. Standardavvikelsen för de enskilda bestämningarna p g a pulsstatistik (stat sa) är angiven i relativprocent. De metoder som använts vid fastläggande av referensvärdena, antalet bestämningar och tillhörande standardavvikelser är också angivna. Halter angivna som heltal är i ppm. Resultat från gammaanalysen är markerade med +.

	Resultat PIXE-PIGE			Referensvärden			
	n=10		stat			Antal	
Element	mv	sa (%)	sa (%)	mv	sa (%)	best.	metod &)
+ Li	18	16	30	-			
+ F	1160	3.1	1.4	-			
+ Na_2O	2.94 %	1.6	0.3	3.03 %	1.6	23	AAS
+ MgO	0.77 %	24	25	0.79 %	1.4	23	AAS
+ Al_2O_3	14.2 %	1.4	1.1	14.54 %	0.31	18	RF
SiO_2	67.2 %	1.1	0.6	68.66 %	0.26	18	RF
P_2O_5	<0.2 %			0.13 %	8.7	23	SP
K_2O	5.44 %	1.3	0.4	5.41 %	0.38	18	RF
				5.29 %	1.2	6	AAS
CaO	2.16 %	1.7	0.9	2.18 %	0.46	18	RF
TiO_2	0.443 %	3.2	1.7	0.48 %	<2.1	18	RF
Fe_2O_3t	3.24 %	1.6	0.4	3.35 %	0.29	18	RF
Mn	423	4.1	6.0	413	6.5	20	AAS
Cu	24	9.4	8	-			
Zn	61	5.8	3.3	-			
Ga	20	5.9	6	-			
Rb	180	1.5	1.2	180	2.2	4	RF
Sr	352	1.2	0.9	362	2.5	4	RF
Y	33	6.5	4.3	42	2.0	4	RF
Zr	342	9.5	1.1	368	2.2	4	RF
Nb	17	9.1	9	23	3.6	4	RF
Ba	1530	2.9	4.1	1470	0.7	4	RF
Pb	20	9.7	10	-			
Th	21	8.2	10	-			

&) AAS - atomabsorptionsanalys med flamma
RF - våglängdsdispersiv röntgenfluorescensanalys på smälta
SP - spektrofotometri

DISKUSSION

Genomgående tyder dessa och andras resultat (ref 16) på att reproducerbarheten (precisionen) över en längre tid uttryckt som en standardavvikelse är bättre än 2 %. Vid om-analys av ett prov inom några timmar är reproducerbarheten bättre än 1 % (ref 16).

Den totalt analyserade massan vid PIXE-PIGE analys är mindre än 5 mg. För zirkoniumbestämningen är det sannolikt inhomogeniteter på denna nivå som ger den stora spridningen. Att spridningen är stor även vid upprepade analyser på samma brickett beror sannolikt på att den bestrålade ytans läge på bricketten har kunnat variera några mm från gång till gång.

I halt-resultaten från de 6 referensproven (som inte redovisats här) finns i några resultat systematiska avvikelser på upp till 10 %. Dessa avvikelser kan inte förklaras av matriseffekter utan beror sannolikt på inhomogeniteter på 5 mg-nivån. Övriga resultat på referensproven och resultaten från SG-provet tyder på att den noggrannhet som för närvarande kan uppnås med PIXE-PIGE metoden är bättre än 5 %.

Vi utför i Lund uppdragsanalyser med PIXE-PIGE metoden och det kostar för närvarande 300 kronor per prov. I dagens läge har vi uppskattningsvis kapacitet för ca 2000 - 5000 analyser av denna typ av prov per år.

Ett stort tack riktas till Z. Solyom och I. Johansson för att jag fått tillgång till deras standardmaterial och analysresultat.

REFERENSLISTA

1/ TB Johansson, R Akselsson och SAE Johansson, Nucl Instr Meth 84,(1970),141

2/ H Lannefors, H-C Hansson och L Granat, Atm Environment 17,(1983),87

3/ M Bohgard, KG Malmqvist, GI Johansson och R Akselsson, Nucl Instr Meth 181,(1981),459

4/ J Pallon och KG Malmqvist, Nucl Instr Meth 181,(1981),71

5/ EM Johansson och KR Akselsson,Nucl Instr Meth 181,(1981),221

6/ L-E Carlsson och KR Akselsson, Nucl Instr Meth 181,(1981),531

7/ L-E Carlsson och KR Akselsson, Adv X-Ray Anal 24,(1981),313

8/ KG Malmqvist, L-E Carlsson, KR Akselsson och B Forslind, Scanning Electron Microscopy,(1983),tryckning pågår

9/ F Bosch, A El Goresy, W Herth, B Martin, R Nobiling, B Povh, HD Reiss och K Traxel, Nucl Sci Appl 1,(1980),1

10/ KR Akselsson och TB Johansson, Z Physik 266,(1974),245

11/ HC Kaufmann, KR Akselsson och WJ Courtney, Nucl Inst Meth 142,(1977),251

12/ LC Northcliffe och RF Schilling, Nucl Data Tables A7,(1970),233

13/ WMJ Veigele, Atomic Data Tables, 5,(1973),51

14/ M Ahlberg och KR Akselsson, Int J Appl Radiat Isotopes 27,(1976),279

15/ L Malmqvist och L-E Carlsson, STU-rapport 78-5441,(1981)

16/ GI Johansson, J Pallon, KG Malmqvist och KR Akselsson, Nucl Instr Meth 181,(1981),81

STATISTISKA METODER OCH DATABEHANDLING AV BERGGRUNDSGEOKEMISKA PROVER

Olle Selinus
Sveriges geologiska undersökning
Box 670
751 28 UPPSALA

Ett av de största problemen i berggrundsgeokemin är att skilja ut anomalier som beror på mineralförekomster. Målet är att skilja på anomalier som härstammar från ekonomiska resp. icke ekonomiska förekomster.

I konventionell tolkning kan en anomali inte urskiljas om inte bakgrunden kan definieras, och den övre gränsen för bakgrundens fluktuationer, dvs tröskelvärdet (fig. 1). Varje prov som överskrider tröskelvärdet anses då anomalt. För negativa anomalier är tröskelvärdet den lägre gränsen av bakgrundsfluktuationerna. Flera förslag finns på hur värdet skall sättas, t.ex. 2 gånger bakgrundsvärdet, medelvärdet plus 2 standardavvikelser etc. Det sistnämnda är den mest använda metoden vilket innebär att c:a 1 prov av 40 uppnår tröskelvärdet.

Jag ska visa konsekvenserna av att använda denna metod. Om vi antar att vi har en fördelning enligt fig. 2A som är positivt skev, måste vi för att använda statistik på den, transformera den till en normal fördelning. Det vanligaste sättet (som jag kommer in mera på senare) är att logaritmera data. Resultatet ser vi i fig. 2B. Den frekvensfördelning som erhålls är något negativ. Aritmetiska medelvärdet är 1.589 (dvs 38.8 ppm vilket också är det geometriska medelvärdet), standardavvikelsen är 0.223 (dvs 1.671 ppm). Tröskelvärdet som normalt definieras som medelvärdet plus två standardavvikelser är 38.8×1.671^2, dvs 108 ppm. Detta värde är högre än det högsta värdet i datasetet. Alltså får vi inget anomalt prov om vi använder denna metod för att bestämma tröskelvärdet.

Ofta ser man i litteraturen att tröskelvärdet används slentrianmässigt, men detta sätt att betrakta tröskelvärdet kan enbart användas för enstaka populationer. I verkligheten består emellertid de flesta prov-

tagningsmedier och analysvärden av flera populationer, varför detta sätt att betrakta bakgrunderna blir felaktigt. Det är bättre att prata om bakgrundspopulationer, resp. anomala populationer. Av detta förstår man att det i verkligheten är så att i de data man har, prover med höga halter kan vara bakgrundsprover, medan prover med låga halter kan vara anomala. Därför är det mycket viktigt att försöka isolera varje population, annars kan resultaten bli felaktiga. Statistiska metoder kan hjälpa till vid denna process, och ett sätt att åskådliggöra flera populationer är med hjälp av sannolikhetsdiagram.

Detta är en användbar grafisk metod. Ena axeln är aritmetisk eller logaritmisk, den andra, sannolikhetsskalan, är sådan att en kumulativ normal, eller lognormal fördelning plottas som en rät linje. Denna typ av diagram är känslig vid avvikelser från normalitet, och påvisar alltså förekomster av flera populationer.

På det diagram som redovisas här (fig. 3, Selinus 1983) och där x-axeln är logaritmisk (och inte linjär) indikerar en böjd linje en normal fördelning och en rak linje en lognormal- eller annan fördelning. De flesta redovisade kurvorna består emellertid av flera avböjningar Knyckar i kurvorna anger att materialet består av flera populationer. Således anger flera knyckar i Fe_2O_3-kurvan att flera populationer för Fe_2O_3 finns. Det går emellertid inte att se i histogrammet för Fe_2O_3, (fig. 4) varför sannolikhetsdiagrammen är nödvändiga för populationsundersökningarna. Ur sannolikhetsdiagrammen kan det ibland också gå att utläsa bakgrund, medelvärde och standardavvikelse för respektive population.

I fig. 5 (Sinclair 1981) ser vi ett idealiskt sannolikhetsdiagram för två resp. tre populationer. De raka linjerna (A, B och C) anger utseendet av resp. population som har tagits fram ur kurvorna.

Men det är alltför vidlyftigt att använda diagrammet på detta sätt. Det går inte att särskilja parametrar från olika populationer med diagrammen, trots att många försöker runt om i världen. Som exempel kan jag visa ett fall (fig. 6) från A. Björklund på Geologiska Forskningsanstalten i Finland. Fig. 6A visar en perfekt avklingande fiktiv ano-

mali och dess frekvensfördelning och kumulativa frekvensdiagram. Fig 6B visar en fiktiv bakgrundspopulation som har en lognormal frekvensfördelning, samt histogram och kumulativt frekvensdiagram för denna. Fig. 6A + B visar den fiktiva anomala komponenten A överlagrad på den fiktiva bakgrundskomponenten samt histogrammet och kumulativa frekvensdiagrammet för denna sammansatta population. Här ser vi att frekvensdiagrammet för A + B inte kan delas upp som nämnts tidigare i fördelningarna A och B. Slutsatsen är att det med hjälp av frekvensdiagram inte går att på ett enkelt sätt separera anomala populationer från bakgrundspopulationer, vilket man på många håll faktiskt försöker göra.

Multivariata statistiska metoder

Därmed kommer jag in på s.k. multivariata metoder. Detta är statistiska metoder som behandlar flera variabler på samma gång, till skillnad från univariata metoder som behandlar bara en variabel åt gången, t.ex. histogram, sannolikhetsdiagram etc. Som jag har antytt tidigare går det i många fall bara att få begränsad information vid studium av enstaka variabler eller element. Vid prospektering efter malmer är ju många element korrelerade med varandra, och därför kan det vara bättre att studera flera element samtidigt. Jag skall nämna tre metoder: regressionsanalys, faktoranalys och diskriminantanalys, varav faktoranalys kommer att behandlas något mera ingående eftersom flera anföranden under mötet kommer just att bygga på eller behandla denna analystyp.

Regressionsanalys

Enkel linjär regression anpassar en rät linje till en omgång data för att få sambandet mellan en oberoende variabel x och en beroende variabel y. Ekvationen för en oberoende variabel x har formen $y = b + m\,x$ där b är interceptet och m är lutningen. När mer än två värden av den oberoende variabeln måste tas i beaktande används minsta kvadratmetoden för att anpassa linjen. I multipel regression används samtidigt flera oberoende variabler.
Ekvationen har formen
$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \cdots + b_n x_n$ där y är den beroende variabeln, $x_1, x_2, \cdots x_n$ är de oberoende variablerna, $b_1, b_2, \cdots b_n$ regressionskoefficienterna och b_0 regressionskonstanten (eller interceptet).

En av de först använda multivariata metoderna hos geologer var multipel regressionsanalys, i form av trendanalys. Som vissa kommer ihåg användes trendanalys i berggrundsgeokemiska undersökningar på SGU bl.a. i Rudtjebäcken och Tomtebo redan i början av 1960-talet. Ett vanligt användningsområde av regressionsanalys är när man t.ex. vill korrigera bakgrunden hos bergarter och andra geokemiska medier, när t.ex. spårelementbakgrunden är en funktion av huvudelementsammansättningen och andra faktorer.

Som ett exempel på regressionsanalys inom geokemin kan visas resultat från Malåbladet. I fig. 7 ser vi att korrigering av organiska bäckprover med avseende på Fe - Mn och -organiska halterna ger till resultat en betydligt mer klar bild över fördelningen i två bäckar. Bakgrunden har alltså korrigerats kort med hjälp av regressionsanalys.

Fig. 8 visar geologin på Malåbladet (23I), medan fig. 9 och 10 visar storregionala organiska bäckprover för korrigerade Zn- och Mo-värden. Här ser vi att man efter korrigering med hjälp av regressionsanalys kan avspegla den underliggande berggrunden i bäcktorvproverna, och att man sedan kan gå vidare och ur dessa resultat få fram anomalier vilka är oberoende av berggrundens sammansättning.

Detta var bara ett exempel på användning. Inom berggrundsgeokemin kan det finnas åtskilliga tillämpningar.

Vid multivariat analys är fördelningen av provmaterialet en mycket viktig faktor att ta hänsyn till. Korrelationskoefficienten som t.ex. faktoranalysen bygger på påverkas allvarligt om variablerna har skeva fördelningar. För att komma till rätta med detta problem måste man undersöka materialet noga med hjälp av histogram och normalfördelningsdiagram för att sedan transformera de variabler som har skeva fördelningar. Ett normalt sätt att angripa problemet på tidigare, har varit att logaritmera de variabler som har legat nära en lognormalfördelning, medan de andra variablerna har använts otransformerade. Denna metod är emellertid ej helt bra.

En orsak till att man rutinmässigt har använt logaritmering av data är Ahrens' "lagen om lognormalitet". Denna lag formulerades av att den

vanligaste frekvensfördelningen av element i prov har positiv skevhet. Detta har lett till att man normalt har beräknat tröskelvärden och gjort andra statistiska manipuleringar på log-transformerade data. Emellertid finns det anledning att anta att skeva fördelningar representerar en överlappande blandning av en eller flera fördelningar (Govett et. al. 1975) (fig. 11). Försök att förbättra normaliteten genom att logtransformera positivt skeva data kan förorsaka överdrivande av bakgrundspopulationer och undertryckande av anomala populationer i den statistiska fördelningen.

Vid logtransformering finns dessutom risken att variablerna efter logaritmering blir negativt skeva från att innan ha varit positivt skeva, ibland till och med mera negativt skeva än de var positivt skeva. Resultatet av allt detta kan bli att de mineraliseringar som skall upptäckas förblir dolda.
Den metod som använts på SGU är "SELLO-transformering". (Lindqvist 1976).

Detta är en metod utarbetad inom SGU som visat sig vara av stor betydelse för dessa berggrundsgeokemiska undersökningar. Variabler med olika skevbarhet transformeras i detta fall till lägre skevbarhet genom att addera eller subtrahera en konstant. Adderingen av konstanten flyttar fördelningen till ett ställe där funktionen log (x) transformerar variabeln till en obetydlig skevhet. SELLO-transformationen förbättrar symmetrin vilket resulterar i mer pålitliga korrelationskoefficienter.

En viktig punkt vid t.ex. faktoranalysen är också problemen med extremvärden. Analysen bygger ju på bl.a. korrelationsmatrisen, och om extremvärden för olika element finns med snedvrids korrelationsmatrisen och faktoranalysen blir inte helt rättvisande. För att undersöka extremvärden ritas histogram för alla element upp, och de statistiska parametrarna beräknas och studeras. Det finns ingen vedertagen statistisk metod för uteslutning av extremvärden, därför måste detta ske på empirisk väg. De mest extrema värdena (detta gäller framförallt för spårelement) utesluts, dvs de som ligger längst ute i svansen på histogrammen. Men i och med att SELLO används kan tämligen extrema värden ändå finnas med utan att resultaten snedvrids.

Faktoranalys

En statistisk metod som ofta används är faktoranalys. I geokemiska prover visar ofta elementhalterna olika komplexa samband med varandra. Om till exempel Co-halten är hög i ett prov, är ofta Ni-halten också hög. Mellan olika element kan man mäta graden av samband och uttrycka dessa som korrelationer. Med ett antal faktorer kan man beskriva dessa samband i faktoranalysen och kan tolka dem och ge dem geologiska betydelse. Man kan då också framställa faktorkartor vid sidan av eventuella elementhaltkartor.

Så kan till exempel Fe variera med halten av kopparkis, och samtidigt variera med Mg och Mn som inte behöver ha med mineraliseringen att göra, utan i stället har en ren litologisk variation. Faktoranalys är en metod att separera dylika variationer, och få fram endast de variationer man vill undersöka.

Med faktoranalys kan man antingen studera sambandet mellan prover (Q-mode) eller mellan variabler (R-mode). Den senare metoden är den mest använda inom berggrundsgeokemin. Hur man studerar sambanden åskådliggörs bäst genom ett geometriskt betraktelsesätt. Variablerna kan representeras som vektorer i en fler-dimensionell rymd. Om vi har två variabler och tre prover kan de presenteras enl. fig. 12. Sambandet mellan variablerna kan mätas med en vinkel Ø. Konfigurationen av vektorerna återspeglar sambanden.

I faktoranalys utgår man emellertid inte från råvärdena på detta sätt utan istället transformerade data så att sambanden är uttryckta som korrelationskoefficienter. Dessa uträknas för varje variabelpar. En perfekt korrelation ger en korrelationskoefficient med värdet +1, medan värdet -1 fås om helt negativ korrelation föreligger mellan de två variablerna, vilket då betyder att ingen korrelation finns.

Det är möjligt att förenkla sambanden mellan vektorer genom att konstruera nya axlar i systemet; dessa kallas faktoraxlar (fig. 13). Geometriskt kan man se på detta så att man placerar den första axeln i vektorsystemets tyngdpunkt, så att summan av kvadraterna av "loadings",

laddningarna, maximeras, nästa axel placeras vinkelrätt mot den första. Flera axlar läggs in på samma sätt. (Högst så många som antalet variabler).

Vid ideella förhållanden bör egenvektorerna i faktormatrisen vara nära /1.0/ eller 0 för att ge de bästa tolkningsmöjligheterna. Så är emellertid i praktiken ej fallet. Därför roteras faktoraxlarna för att få dem att sammanfalla med distinkta grupper av samband som kan finnas i koefficientmatrisen. Först roteras de ortogonala axlarna två åt gången så att variansen av varje egenvektor hos varje faktor är ett minimum, och variansen av egenvektorerna mellan varje faktor är ett maximum. Denna rotation kallas varimaxrotation (fig. 14). Därefter kan en rotation ske av axlarna så att de ej längre är rätvinkliga i förhållande till varandra. Denna operation kallas promaxrotation. Promaxmatrisen är således den oblika motsvarigheten till den ortegonala varimaxmatrisen (fig. 15).

Faktoraxlarna, eller faktorerna tolkas i form av processer och varje faktors inverkan på varje prov kan erhållas genom beräkning av factor scores. Varimaxmatrisen och de ursprungliga analysvärdena används för att få fram dessa. De kan sedan prickas in på kartor. Factor scores anger standardavvikelsen och ligger under eller över 0-värdet som är ett medelvärde. Värde nära noll betyder att denna punkt har medelvärdet av den aktuella faktorn. Ju större det numeriska värdet är, desto mera avviker värdet i denna punkt från medelvärdet.

Jag visar nu ett exempel på en faktormatris. Denna kan förenklas till en tabell, fig. 16. Antalet ursprungliga variabler eller element är 26 st. Om 26 faktorer tas ut kommer varje faktor i stort sett att representera ett element, men vid ett färre antal faktorer kommer de element som har samband med varandra att gå samman i grupper eller faktorer. I fig. 16 förekommer Fe i 5 faktorer (2, 3, 4, 5, 8). Det har alltså varit möjligt att dela upp variationen av Fe i 5 olika variationer, eller populationer.

Med hjälp av faktoranalys kan det också gå att frånskilja t.ex. vissa variationer i materialet som beror på provtagningsfel, analysfel etc.

Hur många faktorer skall man då välja vid tolkningen av faktormatrisen? Antalet faktorer bestäms dels av storleken av egenvärdet och av möjligheten att tolka faktorerna geologiskt.
Det finns inga allmänt accepterade statistiska tester som kan användas för att definiera antalet signifikanta faktorer. Därför måste man på subjektiva grunder ta ut antalet faktorer. Det är emellertid denna subjektivitet som är en av faktoranalysens styrkor eftersom det tillåter formulering och test av olika geokemiska och geologiska modeller. Ett kriterium som ibland används är att man använder de faktorer som har ett egenvärde större än c:a 1, men även de som har ett lägre egenvärde kan vara signifikanta, varför man också i mycket hög grad måste se på faktorernas elementinnehåll, och tolka dem på geokemiska grunder.

Faktoranalys har använts tämligen mycket inom geologin, främst i utlandet, men även i Sverige. Metoden är väl beprövad.

Diskriminantanalys

Lineär diskriminantanalys är en multivariat statistisk metod som beräknar klassificerings funktioner och beskriver populationsgrupper som har definierats som olika från varandra (t.ex. olika bergarter el. malm/ icke malm) (fig. 17). Grupperna definieras på basis av alla variabler, som viktas med hänsyn till deras bidrag till diskrimineringen. En funktion f, beräknas för att beskriva en definierad grupp (t.ex. en bakgrund) utgående från dessa variabler, t.ex. Cu, Pb, Zn etc. Följande formel beräknas:

$$F_1 = a_1\ Cu + b_1\ Pb + c_1\ Zn + K_1$$

där a, b och c är koefficienter och K är en konstant.
En liknande funktion beräknas för en andra definierad grupp (t.ex. en anomal grupp).
Följande formel fås:

$$F_2 = a_2\ Cu + b_2\ Pb + c_2\ Zn + K_2.$$

När funktionerna beräknats och det har visat sig att proverna i de definierade grupperna är rätt klassificerade, kan ett okänt prov klassificeras till någon av de två grupperna genom att ersätta värdet av Cu, Pb

och Zn i funktionerna F_1 och F_2. Värdena som beräknas för dessa prov benämns "discriminantscores". Ett prov klassificeras till första gruppen om F_1 ger den största discriminantscoren: det klassificeras till den andra gruppen om F_2 ger den största discriminantscoren. Denna teknik kan användas för många grupper och många variabler. För varje adderad grupp beräknas en ny funktion.

När funktionerna beräknats måste man ha kvar ett antal prov som klassificeringen är känd för, detta för att kontrollera funktionerna genom att klassificera dessa kända prover utgående från formlerna. Då får man ett begrepp, om huruvida man från början tagit ut de rätta proven till respektive grupp, och kan om så är nödvändigt justera gruppindelningen så att man är säker på att klassificeringen av de okända proverna blir den riktiga.

Diskriminantanalys har använts i tämligen liten utsträckning inom geologin utomlands, och än mindre i Sverige. Metoden är mycket använd och beprövad inom andra vetenskaper och kan utan vidare betraktas som en mycket kraftfull metod för klassificering. Metoden är robust och kräver inte heller nödvändigtvis ett normalfördelat material.

Därmed har jag snabbt gått igenom några av de vanligaste multivariata statistiska metoderna som en bakgrund till några av de föredrag som följer. Sammanfattningsvis bör betonas att man måste komma in mer och mer på denna typ av behandling av geologiska och geokemiska data för att kunna använda berggrundsgeokemiska metoder för djupprospektering. Ju besvärligare geologiska förhållandena är och ju djupare man önskar prospektera, desto viktigare är det att använda sofistikerade statistiska metoder. Men de får inte användas på ett sådant sätt att man avlägsnar sig från verkligheten. Hela tiden måste ett intimt samband finnas mellan geologin, geokemin och de statistiska bearbetningarna, så att man hela tiden står med bägge fötterna på jorden.

Referenser

Björklund, A., 1982: Aspects on the probability distribution of anomalous values in geochemical data.
I program with abstract, 9 th IGES, Saskatoon, Canada.

Davis, J.C., 1973: Statistics and data analysis in geology.
John Wiley & Sons. 550 pp.

Govett, G.J.S., 1982: Rock geochemistry in mineral exploration.
Handbook of Exploration geochemistry. Vol. 3.
Elsvier. 461 pp.

Govett, G.J.S., Goddfellow, W.D., Chapman, R.P., Chork, C.Y., 1975: Exploration geochemistry distribution of elements, and recognition of anomalies.
Mathem. Geology. Vol. 7. Nos 5/6. pp 415-446.

Harbaugh, J.E., Merriam, D.E., 1968: Computer applications in stratigraphic analysis.
John Wiley & Sons. 287 pp.

Levinson, A.A., 1974: Introduction to exploration geochemistry.
Applied publ. Ltd. 614 pp.

Lindqvist, L., 1976: SELLO: A FORTRAN IV program for the transformation of skewed distributions to normality. Computers o Geosciences. Vol. 1. pp 129-145.

Selinus, O., 1983: Regression analysis as applied to interpretation of geochemical data at the Geological Survey of Sweden.
In. Handbook of Exploration geochemistry.
Ed. Govett. pp 293-301.

Selinus, O., 1983: Multivariate statistical analysis in lithogeochemical prospecting, as applied to an area in central Sweden.
Journ. Geochem. Explor. In press.

Sinclair, A.J., 1976: Applications of probability graphs in mineral exploration.
Assoc. Explor. Geochem. Spec. Vol. no 4.

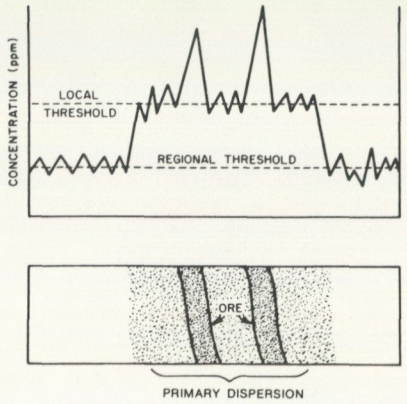


Fig.1 Regionalt och lokalt tröskelvärde. (Levinson 1974)

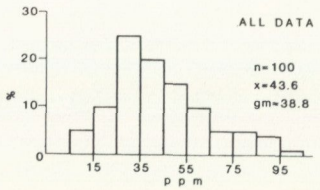


Fig 2A
Rådata (Govett 1983)

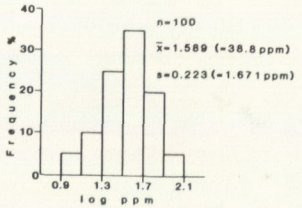


Fig 2B
Log-transformerade data (Govett 1983)

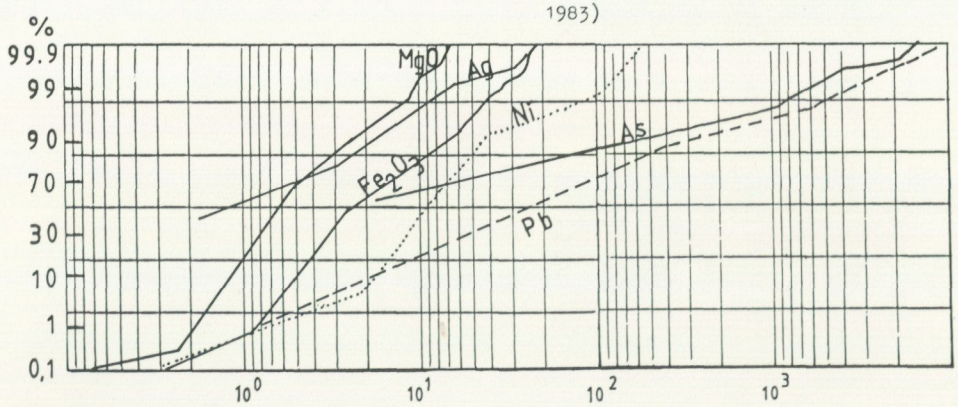


Fig 3. Sannolikhetsdiagram för 6 element från Stollberg
(Selinus 1983)

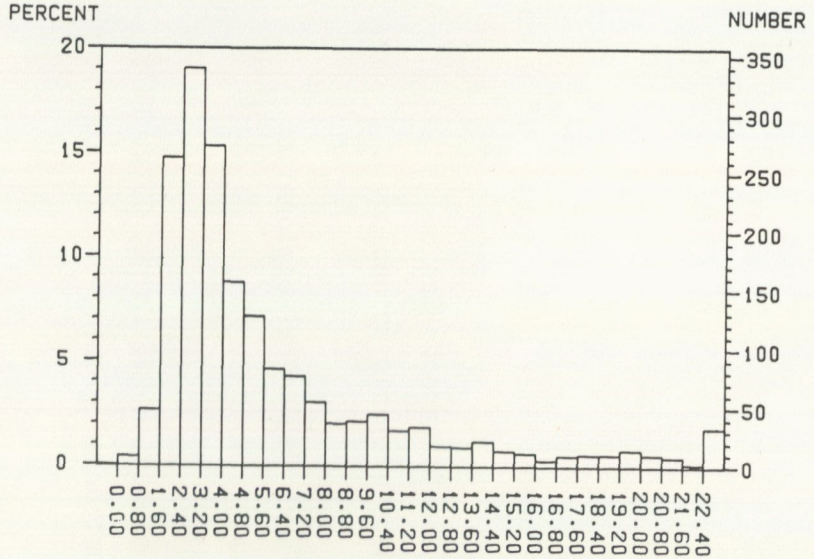


Fig 4 Histogram för Fe_2O_3 motsvarande fig 3. (Selinus 1983)

Diagram illustrating successive combination of 3 populations A, B and C. A and B are combined in the ratio 1:1 to produce (A + B). (A + B) is then combined with C in the ratio 2:1 to produce (A + B + C). Note the 2 inflection points on (A + B + C) at 33 and 67 percentiles.

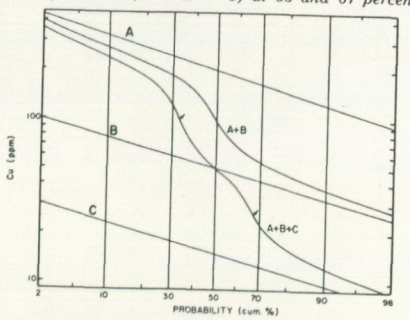
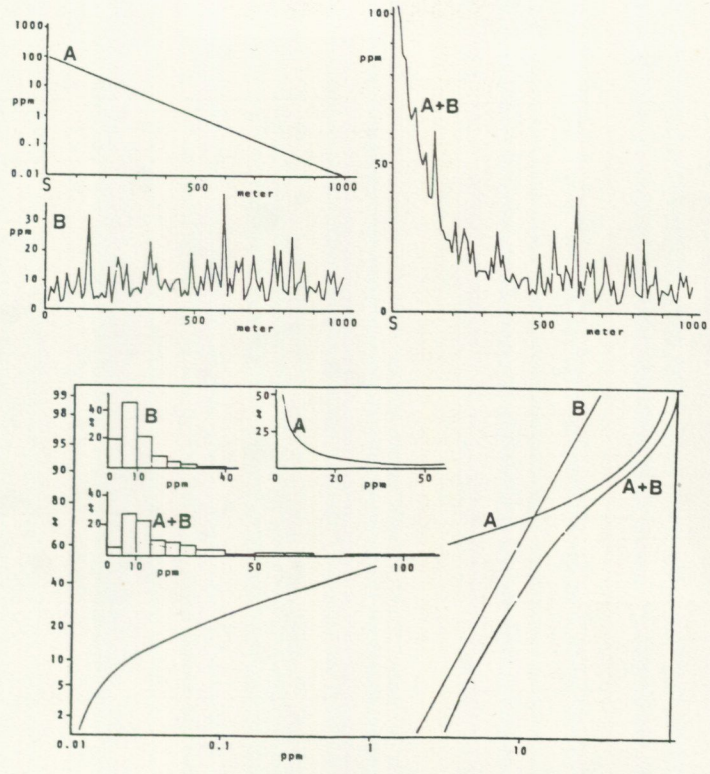


Fig 5 Exempel på sannolikhetsdiagram för flera populationer.
(Sinclair 1981)

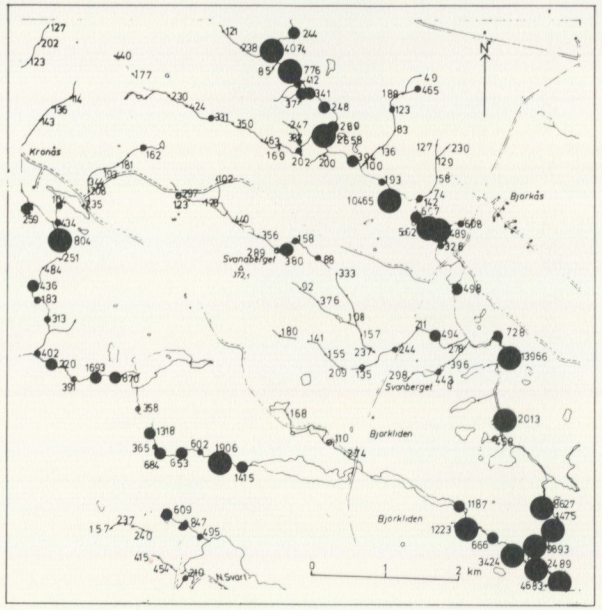


A. The content profile of a perfect exponentially decaying fictive anomalous component and the frequency distribution and cumulative frequency graph of this component.

B. The content profile of a fictive background population having a lognormal frequency distribution and the histogram and cumulative frequency graph of this component.

A + B. The content profile of the fictive anomalous component (A) superimposed on the fictive background component (B) and the histogram and cumulative frequency graph of this composite population.

Fig 6. Exempel på felaktiga slutsatser som kan dras ur sannolikhetsdiagram (Björklund 1982)



LEGEND

1.4 2.0 2.8 6.6 Zn_{anal}/Zn_{comp} corrected value

80 90 95 99 percentile

• sampling point

123 uncorrected value

Fig 7. Jämförelse mellan rådata och korrigerade data med hjälp av regressionsanalys (Selinus 1983)

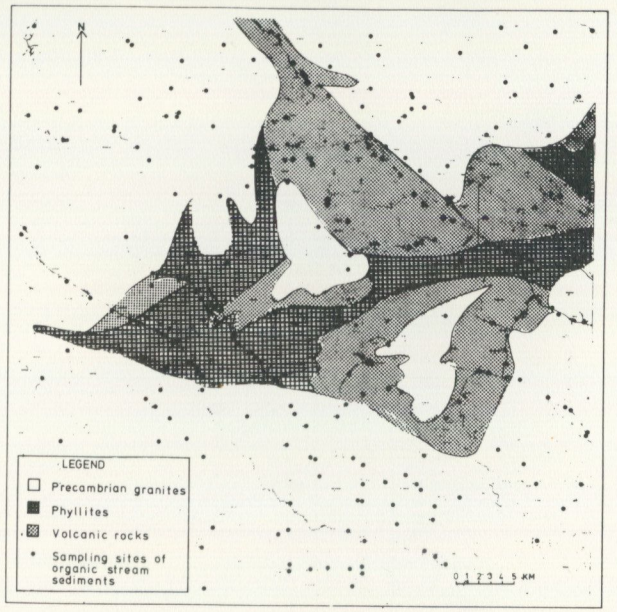


Fig 8. Geologisk karta, 23I Malå (Selinus 1983)



Fig 9. Korrigerade Zn-värden, 23I Malå (Selinus 1983)

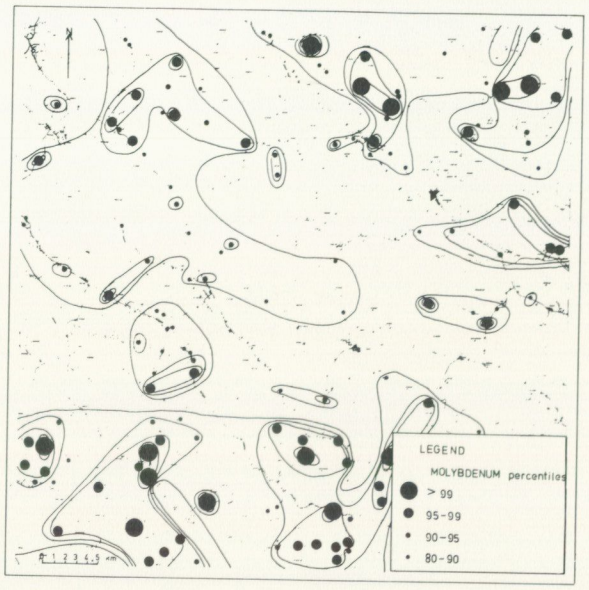


Fig 10. Korrigerade Mo-halter, 23I Malå (Selinus 1983)

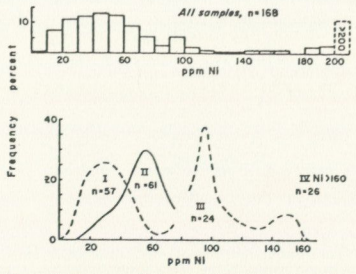


Figure 9. Frequency histogram of Ni in basaltic pillow lavas from Cyprus (top) and frequency distribution curves of component populations (bottom).

Fig 11. Exempel på att det ej går att utläsa ur histogram att det finns flera populationer (Govett 1975)

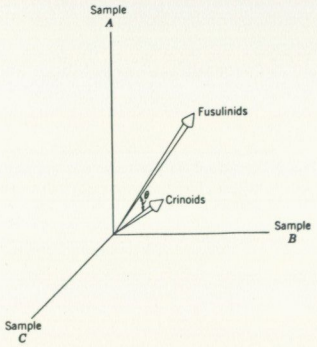


Fig 12. Presentation av variabler som vektorer (Harbaugh, Merriam 1968)

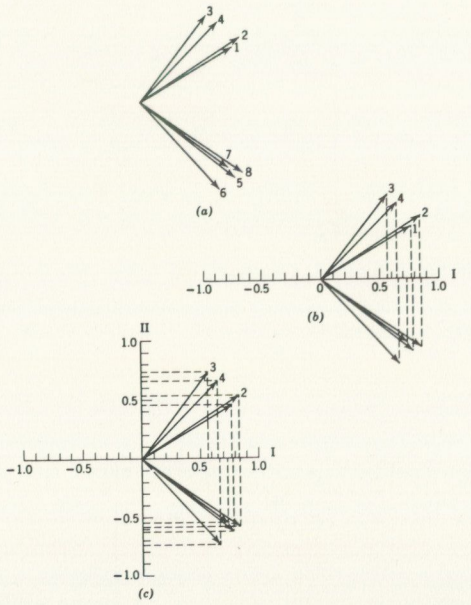


Figure 7-20 (a) Series of eight vectors that represent interrelationships between 8 variables. (b) First factor axis (I) has been positioned so that sum of squared loading values is maximized. Loading values are represented geometrically by distance from origin along factor axis to points where projections (dashed lines) extending from ends of vectors intersect factor axis. (c) Addition of second factor axis (II) so that sum of remaining squared loading values is maximized on this second axis, which is maintained at right angles with respect to first axis. Each vector is now represented by two loading values, one on each factor axis. After Rummel (1966).

Fig 13. Skapande av faktoraxlar (Harbaugh, Merriam)

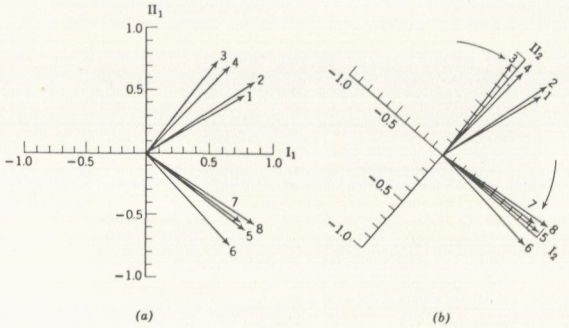


Fig 14. Princip för varimaxrotation (Harbaugh, Merriam 1968)

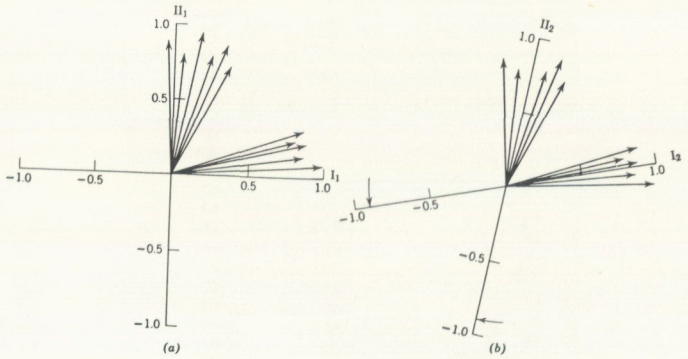


Fig 15. Princip för promaxrotation (Harbaugh, Merriam 1968)

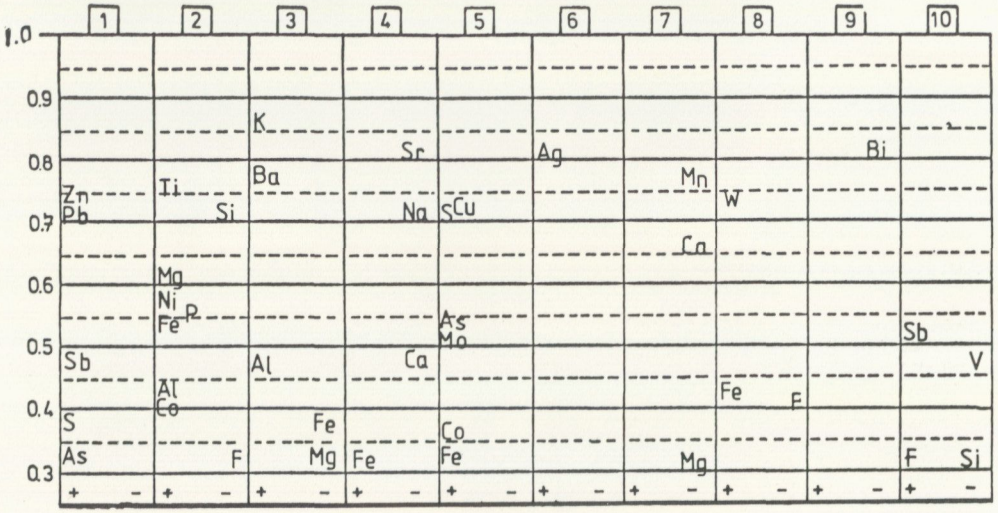


Fig 16. Varimaxmatris
(Selinus 1983)

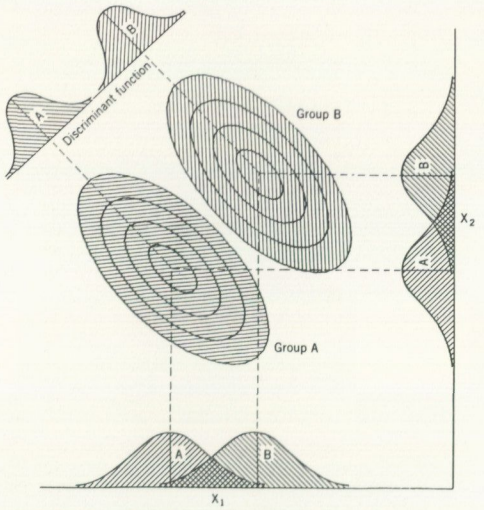


FIGURE 7.3. Plot of two bivariate distributions, showing overlap between groups A and B along both variables X_1 and X_2. Groups can be distinguished by projecting members of the two groups onto the discriminant function line.

Fig 17. Principen för diskriminantanalys (Davis 1973)

GDAM - AN INTEGRATED STRATEGY FOR MULTIVARIATE GEOCHEMICAL DATA ANALYTICAL MODELLING

(With some thoughts on future geochemical exploratory data analytical developments)

by

Kim H. Esbensen and Svante Wold.

Research Group for Chemometrics, University of Umeå.
S-901 87 Umeå, Sweden.

ABSTRACT

Geochemical data can often be advantageously evaluated using bilinear data descriptions, e. g. factor and principal components analysis. Thus the data structure(s) at large can be studied as complementary object and variable interelationships displayed by low order projections of the original data.

By an iterative approach of statistical bilinear evaluations and complementary geographical and geological plotting, multivariate "Normal Sample Models" (NSM`s) can be delineated which reflect the dominating covariance structure in the context of a given geochemical problem. A general geochemical data analytical modelling can be outlined, termed GDAM.

As an example we study the inherent data structure of country rock geochemistry surrounding a typical Swedish massive sulphide ore-field (Stollberg), setting up a NSM for the intrinsic ore aureole zonation. Geographical plotting of the NSM-scores allows prediction of potential new ore bodies.

The general versatility of the GDAM strategy and further geochemical use of such NSM`s is illustrated by defining the concept of a multivariate extension of univariate threshold-values for use in exploration geochemistry.

We also indicate some other vistas for the further develop - ment of exploration geochemical data analysis based on extensions of the type of statistical programs used in this and related studies including the possible "translation" of geo- and petrophysical data information into geochemical maps.

INTRODUCTION

Geological and geochemical materials and products are often the result of complicated interacting processes. The characterisation of such products may result in a polygenetic data matrix (data populations from more than one process). A first survey of the data structure of a complex data matrix can often advantageously be obtained by multivariate statistical methods. In particular factor analysis (FA) and the closely related principal component analysis (PCA), collectively called PCFA, have been found useful in many geological situations.

MULTIVARIATE DATA AND THEIR REPRESENTATION

PCFA data are arranged in a two-way table, a data matrix, Fig. 1. The dimensions are N x M (number of objects times number of variables). Letting each variable represent one coordinate axis in an M-dimensional space, an "object space" is defined. In this space each object (M-dimensional vector) is represented by a point, and the data analysis can be perceived as a geometric problem.

The complementary variable space is defined by N object axes; here the variables (N-dimensional vectors) are likewise represented as geometric points. Fig. 2 illustrates these geometrical concepts used in PCFA. The notation of principal components /factors comprise directions in the object space along which the overall data variance is maximum. Hence the first PCF accounts for the maximum variance in a given data set (in a given data swarm). This is followed by the second PCF, representing that direction orthogonal to PCF_1 which accounts for the next-largest fraction of the overall data variance, etc.

Below we discuss the methods of PCFA in some detail. We shall make intensive use of a master geochemical example to illustrate the various aspetcs.

GEOLOGICAL EXAMPLE: STOLLBERG SULPHIDE ORE AUREOLES

By kind permission we here make use of part of the data presented by Selinus (1983) from the Stollberg ore-field, Bergslagen district. We limit ourselves to outcrop data on 141

samples of country rocks, which are to be statistically analysed with the aim of setting up a model for general trends present (if any) in the aureole surrounding the massive, complex sulphide and oxide ores known from the area; for details as to the underlying geology and geochemistry see Selinus (ibid. and present volume). Table 1 lists the variable definitions relevant for this part of the Stollberg ore-field PCA to be presented. Thus we have a 141 x 28 data matrix, cmp. Table 1 with Fig. 1.

TABLE 1

VARIABLES IN STOLLBERG EXAMPLE

Var. No.	Element	Var. No.	Element
1	X-coordinate	2	Y-coordinate
3	Na	4	K
5	Mg	6	Ca
7	Al	8	Si
9	P	10	S
11	F	12	Co
13	Ni	14	Cu
15	Pb	16	Zn
17	As	18	Mo
19	W	20	Ba
21	Ti	22	V
23	Mn	24	Fe
25	Sr	26	Ag
27	Sb	28	Bi

PCFA

The most important use of PCFA is for dimensionality reduction. PCFA provides variance-maximized "windows" into the full dimensional object (or variable) space, displaying the essentials of the overall data structures, e. g. Kruskal (1978) and Jöreskog et al. (1976). Fig. 2 gives a schematic illustration of this projection characteristic of PCFA. The two complementary ways of presenting reduced dimensionality descriptions of the object and variable spaces will here be called t-mode and b-mode data evaluation, in accordance with the PCFA master data "transformation", see eq. (1) below. While t-mode data plots

(projections) reveal the inter-object relationships, the b-mode plots can be viewed as a geometric map of the intrinsic variable interrelationsships (covariances or correlations).

We here want to stress the complementary nature of both types of plots as one of the strong points of extricating information about data structures using PCFA.

These types of plots can be utilised hierarchiacally for evaluation of underlying object and variable patterns:

The first simultaneous projection of all data classes gives information about the interclass (between-classes) relationships, while subsequent independent (class-wise) data modelling will yield a much more detailed intra-class (within-class) picture. Fig. 2 illustrates both cases.

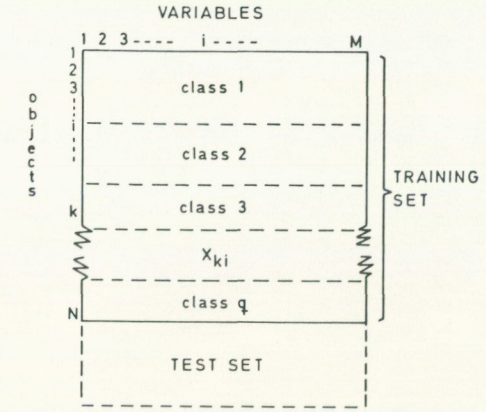
The interpretation of such plots is critically dependent on a thorough understanding of the nature of the geological processes responsible for "producing" the data. Polygenetic data in particular run the risk of appearing "obscure" in typical exploratory data analytical applications of the "shot gun" factor analytical approach without such foundation in geological and geochemical theory. The need for grouping into geological meaningfull data classes plays a critical role. Selective PCFA is the obvious solution to this problem. This forms the basis for the SIMCA strategy for pattern recognition, the application of which on typical exploration geochemical problems results in the data analytical strategy presented in the present paper.

THE SIMCA DATA ANALYTICAL PROGRAM

SIMCA (Soft Independent Modelling of Class Analogy):

Wold (1976) describes the SIMCA method in detail:
Provided that meaningful data classes can be delineated and that the variables x_{ki} are related to the similarity of the objects, the class data matrix X^q can be modelled by the principal component master model in eq. (1), see below.

By first evaluating the the inter-class projections (t_{12} and b_{12} in Fig. 2), a geologically meaningful division of the entire data set (N) into relevant data classes may be obtained. Often several iterations are needed in which outliers are identified and excluded and where provisionary data classes are interpreted with respect to "external" knowledge, e.g. are checked against the existing theory pertaining to the process(es) believed to be responsible for the generation of the data at hand etc. Subsequent refinement of the individual within-class data structures may then be obtained by "independent modelling" of



$$x_{ki} = \bar{x}_i + \sum_{a=1}^{Aq} t_{ka} \cdot b_{ai} + e_{ki}$$

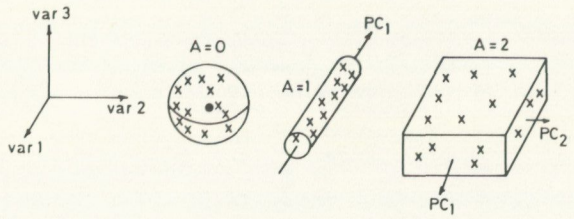


FIGURE 1.

General SIMCA data matrix and geometrical data representation.

The data are organised as an N x M matrix, partitioned into data classes. These may, or may not, be known in advance; in the latter situation some iterative PCFA strategy must be applied, cfr. text.

When problem-relevant data classes are at hand, these are modelled by the principal component master equation (central box). The q classes of the training data set are thus represented by q PC-models.

Multivariate data can be represented in an "object space" (see Fig. 2 and text for further definition). In three dimensions such an object space is depicted at the bottom of Fig. 1. Here is shown the three simplest types of SIMCA PC-models, corresponding to A = 0, 1 and 2 respectively. The geometric center of these models are a point, a line and a plane. Higher dimension analogues are termed A-dimensional hyperplanes.

"Tolerence volumes" can be constructed around these models, which are used for classification purposes. The three standard models are shown with their associated tolerence volumes. Classification of multivariate data objects can be seen to be equivalent to the geometrical problem of deciding wether a given test set object is positioned inside or outside pertinent class model tolerance volumes.

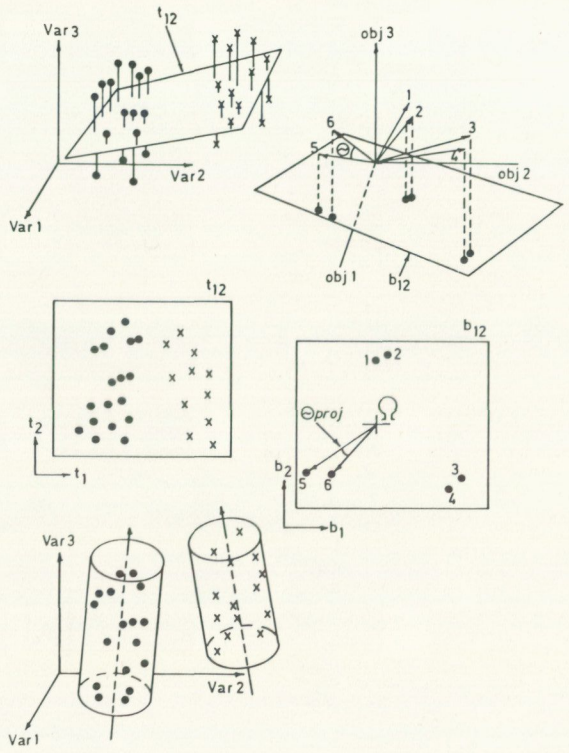


FIGURE 2.

Geometric representation of PCFA bilinear data projections.
Left: object space. Right: variable space.

Multivariate data objects are projected onto the t_{12}-plane in the initial survey PCA. Subsequent, individual modelling of the relevant data classes (filled circles and crosses respectively) are illustrated by two A = 1 models, complete with tolerance volumes (bottom of Fig.).

Representation of the complementary variable interrelationships can be appreciated in the concomitant variable space, defined by the object axes. This may also be viewed as the exact same type of projection representation as the object space, only now applied on the transposed original data matrix.

The b_{12}-plane reveals the projected variable interrelationships: The angle Θ between variables 5 and 6, represented as Θ_{proj} in the b_{12}-plane, is closely related to the linear correlation coefficient $r_{5,6}$. Thus this "load map" (cfr. text) can be viewed as a geometric representation of the intrinsic variable correlations.

In both bilinear projections, the PC_{12}-planes illustrates the maximum possible two-dimensional fraction of the overall total data structure. The t-mode reflects the object interrelationships, complemented by the b-mode variable relations.

these "polished" classes; here the intra-class structure may be studied by using the same analytical aparatus, i.e. classwise t- and b-plots etc. A useful feature of PCFA is the quantitative measures of the fraction of the overall variance explained in a given data set (whole data set or a given polished class data set). Thus a principal component will be characterised by the % variance explained in this direction. The successive PCF´s will be extricated in order of descending fraction explained.

The master equation for PCA follows, here given for a class q. - When eq. (1) is used as a representation of the entire data set (N objects), as in a first survey PCA, the class index q is deleted:

$$(1) \quad X^q_{ki} = \bar{x}_i + \sum_{a=1}^{A^q} t_{ka} b_{ai} + e_{ki}$$

$\bar{x}_i$ denotes the i´th variable mean over a given class. In the A^q product terms, b_{ai} is the a´th loading of the i´th variable, t_{ka} the a´th (factor/component) score of the k´th object, and e_{ki} represent the residuals of the model relative to the original data. These residuals contain both "measurement errors" (analytical errors) as well as "errors" related to the approximative nature of the PCFA model. The "transformation" of the original data into an A-term product-sum reveals the symmetric character of this type of data modelling. This transformation is linear with respect to both t_{ka} and b_{ai} respectively. For this reason PCF-methods are often called bilinear methods and this is the basis for the complementary t- and b-modes of evaluating the data structure.

The number of product terms, A^q, reflects the underlying complexity of the data structure; A is determined by the cross-validation test, Wold (1978). This test gives an internal statistical procedure for determining the limit of no further predictive gain by further factors/components. The cross-validation defines the A^q needed in order not to incorporate accidental noise into the systematic part of the data variance, i.e. the A^q product terms.

In situations of no or little a priori knowledge of the complexity of a given geochemical problem, the cross-validation provides an objective upper bound for the number of components to be extricated. Disciplined geological subjectivity may sometimes constitute an alternative in this context, see Selinus (this

volume).

Fig.s 1 & 2 illustrates the SIMCA class modelling and classification concepts: Classification of objects is made possible by calculation of "tolerance volumes" around data models resulting from a training or calibration step (modelling of traning set classes). Each class is associated with a "representative", mean object distance. New (test set) objects can subsequently be classified relative to the calibrated class models using a modified F-test procedure.

Important additional aspects of the SIMCA program includes the possibility of handling incomplete data matrices (missing data) and a number of possible data scalings and/or transformations of variables. Also one is furnished with quantitative measures of both "modelling power" and "discriminating power" for all M variables pertaining to any given PCA; these measures may be of significance, say when trying to delete variables that are not related to the problem at hand etc. Detailed descriptions of the SIMCA principal component data program are to be found in the technical litterature referred to above, and further references herein. Overviews can be found in Albano et al. (1981) and Esbensen et al. (1983).

The closely related method of factor analysis is based on slightly different theoretical premises. Although theoretical discussion as to the merits of both types of algorithms can be intricate see e.g. Kruskal (1978) for a good overview, the practical use of either method often gives numerically similar results. Cfr. Jöreskog and Wold (1982) for an in-depth discussion. Jöreskog et al. (1976) gives a useful introduction to the subject of "GEOLOGICAL FACTOR ANALYSIS". Selinus (present volume) illustrates the factor analytical approach on the same geochemical example also used in the present paper. A discussion of one particular aspect FA not usually practised in PCA, that of secondary rotations of primary factor solutions can also be found here. An extensive litterature exists as to the "optimal" rotation procedures, e.g. Kruskal (1978) and others.

We here deliberately avoid extensive discussion of rotations of primary PCF solutions. Rotations which are designed to maximise certain loadings at the expense of others after specific, albeit rather arbitrary, criteria, may or may not be reasonable, depending on the degree of increased understanding arising from interpretation of such rotated solutions.
Rotation of any primary PCFA solution would appear to be but a pragmatic problem, which should be solved with specific emphasis on the possibility of better understanding of the primary or rotated factors/components.

The very often used varimax rotation has the property of "distributing" the variance present in the initial factors onto a greater number of rotated factors. This can indeed lead to simpler and easier geological interpretation of these rotated factors, while at times simultaneously tending to go against the dimensionality-reduction. The present geological example presented below will illustrate that the inherent information present in a given data matrix may alternatively be expressed as a "greater" number of varimax-rotated factors or a "smaller" number of primary principal components.

STOLLBERG ORE AUREOLE: PCA RESULTS

The application of GDAM on the problem of prediction of aureoles surrounding ores have given rise to an integrated strategy, MOGDAM (Mineralisation-Optimized GDAM). We shall present this strategy by way of practising a PCA on the master example of the massive, complex sulphide and oxide ores of the Stollberg ore-field, or rather on the surrounding country rocks.

Fig. 3 gives the lay out of the Stollberg ore-field samples. For obvious geological reasons we make use of a homogenous data set concisting of quartzites and leptites. Two geological faults are described by Selinus (1983); these are not considered to displace the hypothetical zonation around the Stollberg ores to any very great extent, hence they are ignored in the present data analysis (specific consideration of these faults of course would be necessary in detailed work).

For the first analysis 65 samples from the northern part of the area (north of line A - B) were used for PCA. The remaining samples south of A - B were used for prediction, see below. (Line C - D on Fig. 3 represents an identical division; later analysis was performed on samples south of C - D with concommittant prediction north hereof).

Fig. 4 gives the b-mode plot of this PCA on the 65 northern samples. Altogether three PC´s are used in this plot, accounting for 22, 16 and 9 % of the total data variance respectively.
In Fig. 4 we have indicated what we consider as the target variables with respect to the geological objective of the data analysis (sulphide and Fe-Mn-oxide ore formation). The PC_1 is NOT of interest: we interpret this component to represent an overall acid - basic bulk chemistry diversification of the whole-rock geochemistry; this we consider not to be directly related to the ore-forming process $\pm$ possible epigenetic processes to be further described below in the discussion. We consequently throw away the variables with high loadings on PC_1 only. By way of contrast the positive ends of both PC_2 and PC_3 clearly are related to the

complex sulphide and Mn-bearing iron oxide ores known to constitute the Stollberg ores. Consequently we concentrate on the variables defining both the positive as well as the negative ends of PC´s 2 and 3, altogether 13 variables, in that we also delete variables displaying low loadings on all three PC´s (variables only indicated by their Table 1 designating numbers in Fig. 4).

This constitutes the first variable screening, directly related to the geological/geochemical nature of the specified problem. In very close connection to this we subsequently investigate the covariance structure displayed by the inter-object projection, but here using only the t_{23}-plot !

Fig. 5. shows that the overwhelming common covariance is defined by the 61 samples defining a SW-NE trending data swarm. This data constitution isolates 4 outliers, specifically marked geographically on Fig. 3 as well. It will be appreciated how this Outlier Detection is intimately bound up with the definition of a "Normal Sample Model" (NSM), in fact this step in the analysis must be viewed as totally interdependent (NSMD/OD), Fig. 5. It will be appreciated how relevent data information (relevant to the specified geological problem) has been reduced to one dimension, the $PC_{\star}$-direction, outlined in Fig. 5. Note that this PCP_{23} projection only makes use of 25 % of the total original data variance (the first 22 % we deliberately discharged via the PC_1 deletion; the remaining 53 % is noise outside this PC_{123}-hyperplane.

Subsequent PCA on this $PC_{\star}$ data set raises the overall data variance explained to 35 % relative, now explained relative to this second iteration PCA of this NSM-direction. Calculating the scores for all original samples (less the four isolated outliers) with respect to this $PC_{\star}$-model follows. One-component scores do not lend themselves as easy to graphical display as for instance Fig. 2, however, so we proceed directly to the next step in the data analytical procedure, that of plotting these scores onto the geographical/geological map.

Fig. 6. gives this plotting in which we have contoured the resulting $PC_{\star}$-scores. For a critical geological evaluation of the validity of the results we have overlaid the positions of the KNOWN MINES OF THE STOLLBERG ORE-FIELD, which so far has not entered our calculations at all. The positioning of known ores is specifically NOT used in any MOGDAM-type data analysis, but is of course of vital interest in the Fig. 6 evaluation of the PCA results.

The correspondance between the areas of high $PC_{\star}$-scores around the known ores and mines in the Stollberg area is quite satisfactory. All known mines are incoorporated within the con-

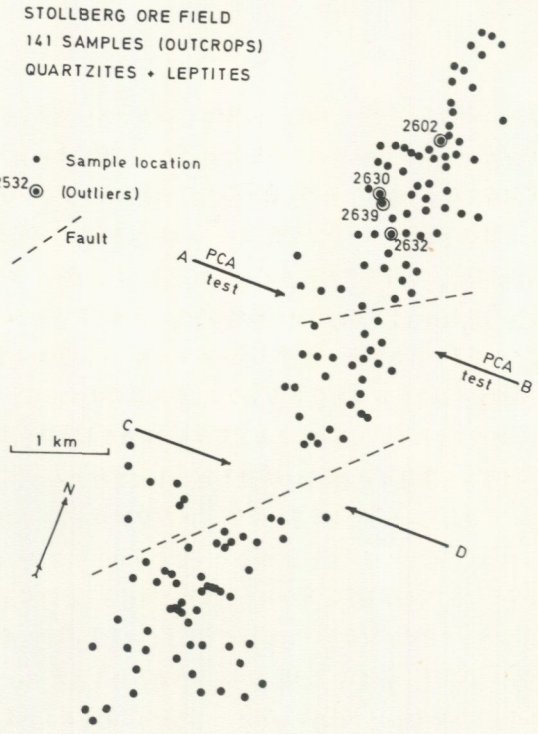


FIGURE 3.

Geographical localisation map of all Stollberg samples.

North-east of line A - B, 65 samples are submitted to PCA; the remaining samples south-west hereof are subjected to prediction of PC-scores.

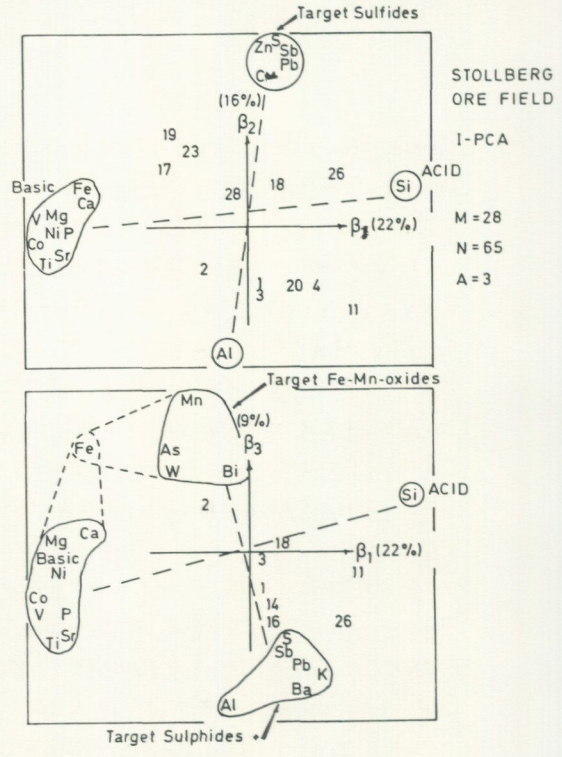


FIGURE 4.

Load maps for the I-PCA of the NE Stollberg samples.

The first three PC´s (b-mode) of the 65 NE Stollberg samples are illustrated by the PC_{12} and PC_{13} load maps. The PC_1 in both plots is interpreted as NOT being related to the ore-forming processes, cfr. text. PC´s 2 and 3, however are interpreted as reflecting the ore-forming processes responsible for the data covariance distribution in the complementary t_{23}-projection shown in Fig. 5.

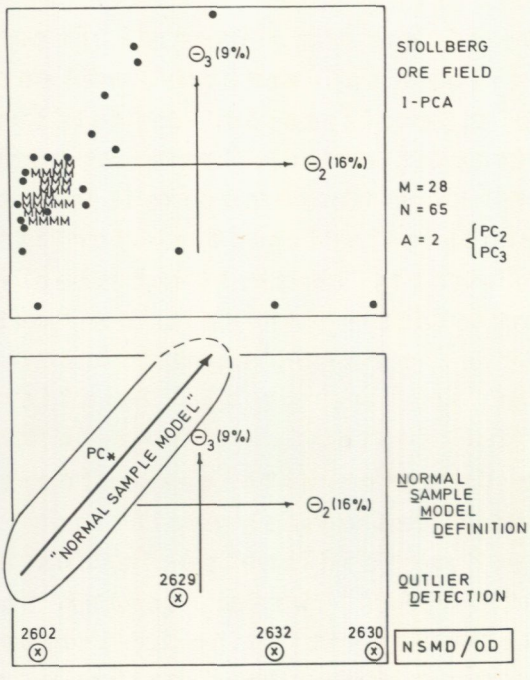


FIGURE 5.

t-mode representation (PC_{23}) of the NE Stollberg samples.

The critical step of Normal Sample Model Definition/Outlier Detection (NSMD/OD) is illustrated by specifically designating four outliers. These outliers are also plotted in Fig. 3.

The NSMD "dimension" is designated PC_*. This represent the largest common covariance structure exhibited by the country rock geochemistries pertaining to the Stollberg ore-field (NE part). Note how the SIMCA procedure allows the extrication of the fraction most informative variance explained, here only 25 % of the original variance.

Subsequent re-analysis, II-PCA iteration, of these PC_* samples (61 samples), with the reduced variable suite illustrated in Fig. 4, results in calculation of the corresponding one-dimensional PC_*-scores, which have been plotted in Fig. 6.

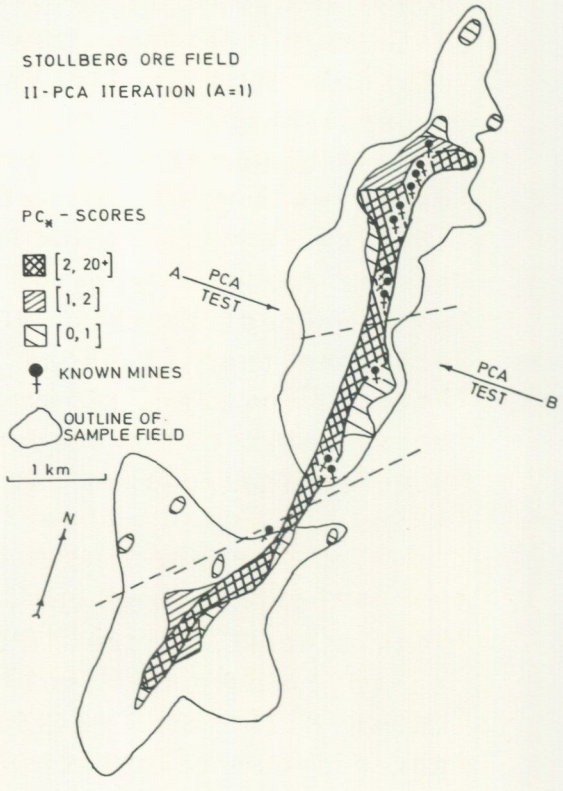


FIGURE 6.

Geographical plot of the PC_*-scores, II Stollberg PCA.

Geographical plot of the PC_*-scores of the II-PCA iteration of Fig. 5. Contouring of the positive scores reveal a symmetric zonation around the known mines in the entire Stollberg field (overlay of mine localisations).

A general agreement between the strike of the known ore-field and the PC_*-score-field is evident. In the text, the interpretation of the countour-field as reflecting epigenetically related ore-aureoles is commented upon in detail.

Also shown the extention of the sample field for comparison.

Note the logarithmic nature of the PC_*-score distribution (legend).

toured areas, except for the southernmost mine, the "Brus malmen" mine, which still is very close however. Of greatest prediction-interest is the area SW of the Brus mine: an elongated , coherent, weakly sinusoidal area streching some 2 km SW, which clearly can be seen in Fig. 6. The contoured area in Fig. 6 is interpreted to reflect genetically related aureoles surrounding the known ores. The interpretation of this SBRUS area (South of Brus) in Fig. 6 would then be as one of potential interest for closer geological/geophysical/geochemical investigations in that the multielement geochemical "fingerprint" of this area corresponds exactly to those immediately surrounding all known ores in the district.

In order further to test these predictions we have made a second analysis under further constrained conditions. In the area SW of Brus we have taken out the 50 samples SW of the line C - D on Fig. 3. On these samples we carry out a PCA of identical type to that just accounted for, with the aim of predicting similar PC_*-scores for the area NE of C - D.

This situation simulates a completely "black box" exploratory data analysis of an area of "Stollberg type" with the only a priori knowledge that complex, massive sulphide ores as well as Mn-bearing iron-oxide ores have been indicated by various prospecting efforts, a realistic prospecting situation; indeed a rather severly restricted such.

The analysis runs very closely to that for the northen Stollberg area, albeit with some noteworthy minor differences. The polishing of the variables follows the same set of rules as outlined above; a slightly different set of variable positions in the pertinent b_{123}-plot now constitutes the defining set of PC_2 and PC_3 directions, Fig. 7 ,but the dominating acid - basic PC_1 polarity is still the most notable first order characteristic of these SBRUS country rocks geochemistries. Note how both PC_1 and PC_3 are "mirrored" with respect to their earlier lay outs (in PCFA the polarity of PCF-directions are somewhat arbitrary; reflection through the origo can be applied to all solutions at large, corresponding to a "rotation" of 180°, with no change in the numerical solutions). In the present example we simply use these "mirrored" primary solutions directly.

The subsequent NSMD/OD-stage of the SBRUS t_{23}-plot is shown in Fig. 8. Clearly a closely similar situation is at hand. Only one (strong) outlier can be detected here (a second possible outlier has also been delineated, but wether this be included in the NSM or be designated as an outlier is of absolutely no practical consequence). It will be appreciated how we again find a one-dimensinal PC_*-direction for the overwhelming part (48, or 49, out of 50 samples) of the specified data set.

An identical evaluation of the corresponding PC_*-score pre-

diction and contouring on the Stollberg area north of C - D, plotted on the geographical map is presented in Fig. 9, again complete with overlay of the known mines.

The correspondance with the known ore-field is slightly less well resolved in this prediction run, but the essential strike and width of the ore-field can be clearly appreciated. We note that the coherence of the contour-field surrounding the 12 northen mines (less Brus) is well recovered, while the extension of this field to the SBRUS-field of potential interest in the first analysis does not come forward in this second run. The very strong outlier in Fig. 8 is located exactly here, Fig. 9. Specific study of this singular sample indicates that it possibly can have been weakly mineralised and that it consequently does not belong to the country-rock data set proper. This part-anomaly can only be detected in the relatively sensitive SBRUS- PCA. The SBRUS area does also come forward in this second run, however, albeit slightly less strictly resolved.

Fig. 10 finally compares both the north-south and the south-north prediction of these two runs. As can be seen the essential information extricated is one and the same: the strike and width of the Stollberg ore-field indeed do lend itself to be revealed by this integrated PCA strategy.

IMPLICATIONS OF THE STOLLBERG MOGDAM

We have shown that the systematic geochemical information present in the country-rocks surrounding the Stollberg ore field can be extricated by using a one-step, integrated geochemical data analytical modelling strategy (GDAM), by making use of geological knowledge and inferrings as to the likely ore genesis. In particular it is of importance to state the geological premisses for an undertaking of the present kind:

i)The information interpreted in the NSM of the country-rock geochemistry corresponds to genetically related aureoles surrounding the Stollberg ores. As has been discussed in detail by Selinus (1983), these aureoles most probably must be attributed to a secondary, epigenetic metamorphic overprinting of both the ores and the country-rocks. This would account for the symmetric zonation around these ores, now reflected in the symmetric PC_*-scores, or the equivalent discriminant scores of the study by Selinus. Of course primary, syngenetic aureoles could have been detected just as well in this respect. Such primary aoreoles

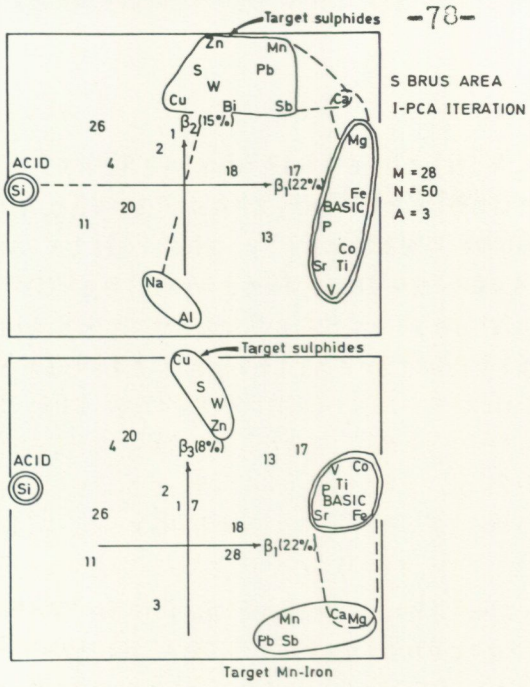


FIGURE 7.

Load map for the SBRUS area I-PCA results.

For the South of the Brus mine area (SBRUS), the I-PCA iteration load map indicates much the same overall variable interrelationships as for the NE Stollberg area, cmp. Fig. 4. In particular the PC_1-direction also here has to be discharged as NOT being related to the ore-forming processes.

The detailed picture differs slightly however. Ca and Mg takes the place of Fe in the PC_3-definition for example, and Na joins Al along the PC_2-direction. In general the ore-related trace element pattern remains much the same. In the text some PCFA intricacies pertaining to "reversals" of the PC-polarities are discussed in detail.

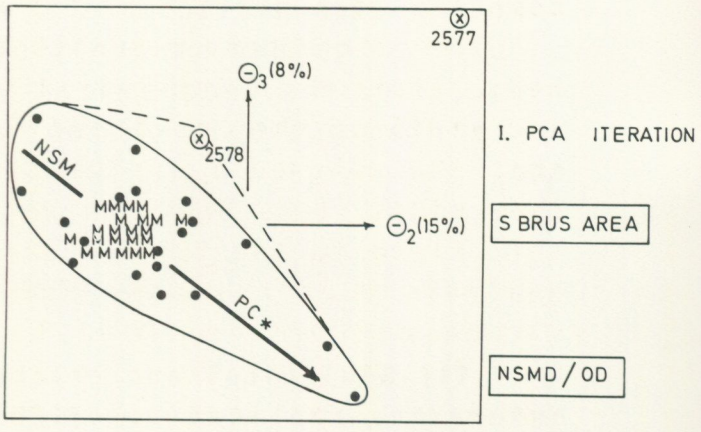


FIGURE 8.

NSMD/OD-stage of the SBRUS I-PCA Iteration.

The Normal Sample Model Definition/Outlier Detection stage in the SBRUS run reveals only one strong outlier (sample 2577). Again the combined variance explained by the PC_{23} plane used amounts to the meager, but very informative, fraction of 23 %.

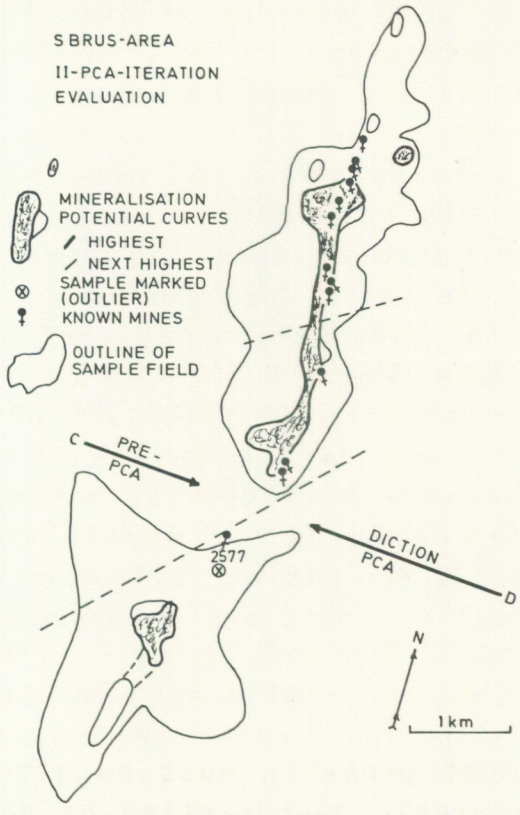


FIGURE 9.

SBRUS area PC_*-score geographical plotting and evaluation.

Prediction of sample PC_*-scores NE of C - D based on the SBRUS PCA SW hereof reveals a contour-field slightly less tightly defined than that of Fig. 6. The essentials of the known ore-field strike is however clearly revealed. The only major discrepancy is the occurrence of the SBRUS potential area isolated from the area surrounding the 11 northernmost mines. Outline of sample field again shown for comparison.

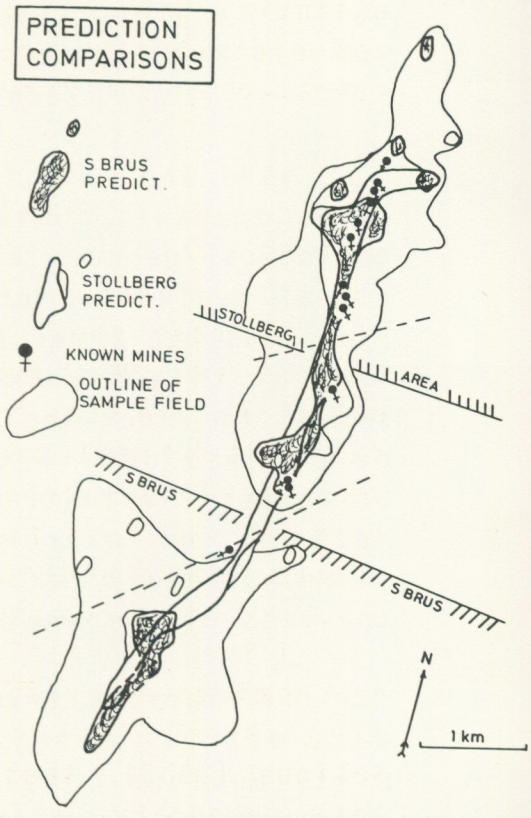


FIGURE 10.

Prediction-comparisons between the N-S and the S-N PC_*-scores.

An exellent concurrence between the north-south and the south-north prediction score-fields is appearent. This is interpreted as a positive internal ckeck on the validity of the MOGDAM strategy as applied to the sulphide ore aureole case of the Stollberg area. The geological prerequisites for this kind of geochemical data analytical modelling is specifically discussed in the text.

Both MOGDAM runs succeed in delineating the Stollberg ore-field by the statistical treatment of the non-mineralised country rocks geochemistries alone and can be compared with the study of the same pattern by Selinus (present volume).

related to syngenetic wall-rock alteration in general must be expected to be present at the foot wall of these types of ores, however, cfr. Hedström this volume. Naturally the data analysis should be guided strongly by such underlying geological knowledge, i.e. the geochemical data analysis of course should then be carried out only on foot wall data in these circumstances etc.

ii) Geological and geochemcial knowledge must be integrated before any application of EDP is considered. The definition of the original data set for analysis in general should be as closely as possible related to such "external" geological knowledge, indeed in all stages of the data analysis as we have given some examples of in this study.

The present symposium saw a very clear exposition of the merits of the greatest possible integration between geology, geochemistry and data analysis, e.g. contributions from Bjurstedt, Selinus, Hedström, Armands, Drake, Lagerblad and Malmquist, as well as via specific reference to some salient studies from the Swedish Caledonides of very great interest in this respect, e.g. Zachrisson (1982), Stephens (1980, 1982).

iii) One specific statistical aspect of the present study needs emphasis. Outlier detection is a much more interdependent geological/geochemical/statistical problem than the mere statistical evaluation of univariate frequency distributions one variable at the time. Indeed essential information may very well be lost by this traditional procedure. Fig.s 5 & 8 in this study serves to underline that outlier detection and isolation has to be carried out in the context of a given geological problem. Univariate evaluation would inevitably have deleted salient objects of the "extreme" end of the pertinent PC$_\star$-models, perhaps in univariately extreme frequency distribution tails, but nevertheless of overwhelming geological interest and relevance.

iv) Various transformations may be applied to the original data matrix, amongst other reasons for making the univariate distributions comply better to an often found stipulation of multivariate data analysis: It is often held that an absolutely critical prerequisite of f.ex. exploratory PCFA (as well as certain other multivariate statistical methods such as multiple regression) is that of a multi-normal distribution. In geochemistry there is a long standing tradition for the logarithmic transformation for instance. This use - and misuse - has been

well discussed by Selinus (present volume).

A useful , and elegant, Swedish developement of the logarithmic transform, designed so as to do away with the mechanical defects of a too rigid log-transform, is that of Lindquist (1976): SELLO - SELective LOgaritms. While making certain that all limiting univariate distributions are as SYMMETRICAL as possible, which is the essential aspect of the normal distribution used, it is by no means certain that f.ex. a SELLO-transform forms a necessary guarantee for obtaining the desired joint multi-normal distribution, as was indeed commented upon by Lindquist, ibid; see also Carrol (1961). The SELLO transformation, however, very often improve on exploratory PCFA applications within geochemistry, as is now well-known, cfr. Selinus, present volume as well as Lindquist (1976).

Transformations do not, however, constitute an absolute paradigma of multivariate statistical analysis, PCFA included. In this context we direct the attention of the reader to the fact that the present analysis has been carried out on untransformed data. The only data pretreatment has been a very often used SIMCA option called class-scaling. For all data classes individually considered, all variables were scaled so as all to have equal variances = 1 before PCA. This has the desireable effect that all variables initially are included in the PCA with equal weight so as to reveal the underlying correlation structure without being influenced by different measurement units and/or variances - perhaps only to be deleted at a later stage of the analysis to be sure, but not until they all have had their chance to contribute to the common correlation.

The entire geological data analysis above was thus carried out on scaled but otherwise untreated data; the result of this rather direct approach simply showed up in the resulting distribution of PC_*-scores, which was significantly positively skewed, cfr. the legend to Fig. 6. This asymmetry constitute no difficulty for the geological interpretations or for the contouring etc, when evaluated with respect to the NSM´s of Fig.s 5 and 8. - Of course the entire analysis could alternatively have been carried out on SELLO-transformed data, ONLY AFTER THE NSMD/OD-STAGE ! It is the possiblity of a geologically guided NSMD/OD-stage that perhaps most of all distinguishes the present strategy from other types of statistically more "self-contained" programs.

In full concordance with the conclusions of Selinus (present volume) we would also like to stress the significance of the possibilities of flexible geochmeical testing of various working hypotheses that often crop out during the various stages of a particular data analysis.

THE CONCEPT OF A MULTIVARIATE NORMAL SAMPLE MODEL (NSM)

Directly related to the above emphasis on the Fig.s 5 and 8 definitions of NSM´s with associated outlier detection, we can formulate a multivariate equivalent to the univariate concept of a geochemical threshold value, representing a demarcation between a regional or local background viz. anomalous values for any given specific element.

Fig. 11 schematically illustrates the equivalent multivariate background polulation of samples, defined as by a Normal Sample Model in the full M-dimensional object space. The advantage of this type of background model is clearly related to the possibility of detecting outliers which are simultaneously anomalous with respect to the OVERALL COVARIANCE MODEL displayed by this type of "normal" background population. Note also that these multivariate outliers at any time can be projected onto their individual directions, which is nothing but the original variables i. The practicalities of defining this type of NSM are identical to those of recognising NSM´s for the geochemical aureole trend modelling above, Fig.s 5 and 8.

The implications for the interpretation of the present type of NSM is somewhat different, however. In the threshold context, the interest in the NSM lies exclusively in its role as reference models being equated with a geochemically more flexible background model. - The univariate threshold value concepts translates into a planar, horisontal reference model when plotted onto a geographical/geologcial map. The relevant background model delimiting surfaces pertaining to the multivariate NSM´s can be perceived via the NSM-scores, which, when geographically plotted, are represented by contoured NSM-score surfaces. Fig. 12 gives a schematic illustration of these possibilities: a) would illustrate a one-component (A=1) NSM; a) + b) would pertain to a two component NSM, and background models of any complexity can be handled easily.

The NSM-score-contoured surfacces give a direct representation of the general geochemical trends exhibited by the background population. This feature allows considerably more flexibility to be built into the modelling of relevent background models. In fact the complexity of these models (A) can only be determined with extreme difficulty (if at all), if not by making use of the cross-validation feature.

The complexity of the background model is directly determined by the complexity of the (sub)data set defined for this NSM-modelling. The exact (sub)data set definition of course is a

matter for very careful geological and geochemical consideration, and is NOT a statistical matter.

As an example of the usefulness of this type of Normal Sample background Models Fig. 12,c) gives an example of a typical residual map, such as is well known from geochemical prospecting. While traditional residual maps all pertain to one specific threshold value for one element at the time, the present GDAM NSM´s allow simultaneous representation of the compound residuals ($|e_{ki}|$) pertaining to the full multivariate NSM´s. Alternatively one can opt for the full series of M projections of these compound residuals. Each such i-projection would correspond to a univariate traditional residual map, but based on this type of multivariate background models. Such residual maps would be easy to use in exploration geochemistry, as their meaning is identical to those for traditional univariate maps.

Some further theoretical background to these considerations of NSM´s can also be found in Esbensen et al. (1983).

THE GDAM STRATEGY

The MOGDAM strategy is outlined in Fig. 13.

The GDAM strategy of course is not restricted to the case of "aureolic information" illustrated by the present master example. Some possible applications of the multivariate NSM´s in exploration geochemistry have already been commented upon above. Other GDAM applications include:

i) Classification problems in which a geochemical problems can be formulated as one of data class analogies, cfr. Fig.s 1 & 2. All types of training and classification problems are handled in a one-step SIMCA procedure. Examples from exploration geology are many and varied, e.g. rock-type classification, mineral classifications, "target" models of rocks genetically associated with specific mineralisations, etc.

ii) The initial PCA of what has been termed the "entire data set" in Fig.s 1 & 2, closely corresponds to a graphic cluster analysis, or "shot gun" factor analysis. Various extensions of the contouring techniques used above for NSM´s approximate well as trend surface analysis, etc.

iii) A more "open" version of the present GDAM strategy is presently being used in other exploration chemistry works, e.g. multivariate statistical analysis of organic stream sediments, terrigenic stream sediments as well as various types of moraines and till/bedrock lithologies. According to the different geologi-

cal contexts the GDAM strategy of course need various modifications, but the general lay out of Fig. 13 remains valid.

DISCUSSION

The GDAM strategy for geochemical data analysis has been applied to the Stollberg master example. A very useful comparison to other multivariate techniques can be carried out in that the present example is but an exercise to illustrate the MOGDAM strategy. Selinus (1983, and present volume) presents the original Stollberg data analysis in which good use is made of the combined proporties of factor analysis (FA) with subsequent discriminant analysis (DA).

It is possible directly to compare the resulting geographical discriminant-score plot of the exact same 141 outcrop samples as have been analysed in the present example: The combined FADA achieves a distinctly more detailed picture of the "resolution" of the aureole zonation surrounding the Stollberg ores using 6 factors as input for the discriminant analysis, as does the equivalent one-component MOGDAM picture; the essential information of the strike, width and internal coherence of the ore-field however is identical in both types of analysis.

The interesting area SW of the Brus area common to both the FADA and the MOGDAM results of course constitutes a very interesting area of a potential blind ore body at depth, or "up in thin air" as a mining geologist pointed out at the symposium, meaning an ore body once residing above the present erosion surface, now only detectable by this aureole trend. Clearly this latter situation would constitue an ironic case of an ore body prediction by these kinds of GDAM´s; geological follow-up will decide as to which alternative.

Fig. 14 lists the essentials of both types of analysis: While the MOGDAM procedure constitutes a Pattern Cognition data analysis (PaC), the FADA procedure comprises a supervised type of data analysis, a Pattern ReCognition (PaRC). Fig. 15 further compares these two strategies:

The important difference between PaC and PaRC is comprised by the DA part of the FADA. All discriminant analyses relies on training of the two (or more) classes of data to be distinguished by graduate discrimination function-scores. For example, in the FADA Stollberg analysis, this step is comprised by selecting samples known to be country-rock (C. R.) samples as close as possible to the Stollberg ores, as contrasted with another training set of C. R. - samples known to be situated as far away as

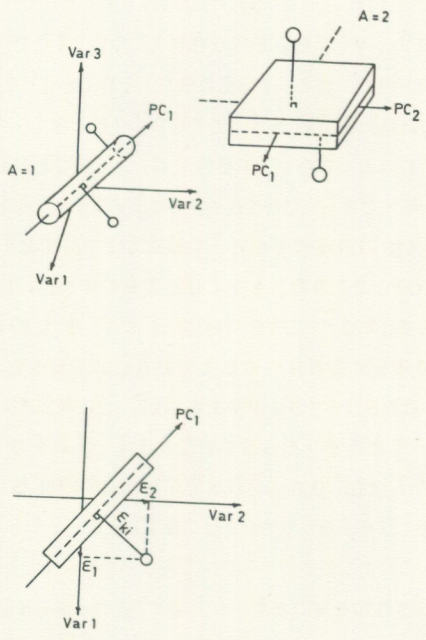


FIGURE 11.

Multivariate NSM's serving as geochemical background models.

Two multivariate Normal Sample Models of differing complexity are shown. These models serve as multivariate background polulation models, substituting for univariate threshold values, see text for details.

Outliers detected with reference to such NSM's (four shown in upper panel) represent multivariate anomalous samples, anomalous with respect to the overall, common covariance structure of all background samples, which collectively define the NSM's. Lower panel illustrates how such multivariate outliers can be projected onto the i original variable directions, and therefore can be decomposed into these constituent coordinates.

If one so wishes then, the multivariate outliers can be translated into their univariate equivalents, still retaining, however, their geochemically much more adequate relationships to the reference background population models.

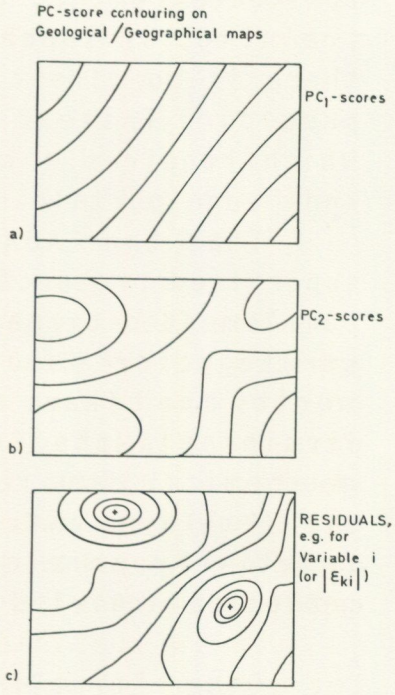


FIGURE 12.

Background model PC-scores on geographical maps.

a) PC-scores corresponding to the A = 1 multivariate background model in Fig. 11.

a) + b) Complementary PC-scores corresponding to the A = 2 background model in Fig. 11. - Successive iterations into higher dimensions would be represented by still more maps, totalling A.

The versatile and flexible background population modelling tool of the present SIMCA/GDAM NSM's is evident: A much more complex background-delimiting surface can be modelled, with which to gauge geochemically anomalous samples. This should be compared with that of a horisontal, flat surface, which is the map equivalent of the univariate treshold concept.

c) Schematic representation of a residual map pertaining to either the a) or the a) + b) situations above. In these types of residual maps one has the option of choosing between the compound residual measure or M projections corresponding to the bottom Fig. 11 multivariate residual decomposition. These latter maps would corespond exactly to the lay out of traditional univariate geochemical residual maps, but would be based on the a) or a) + b) type of background modelling.

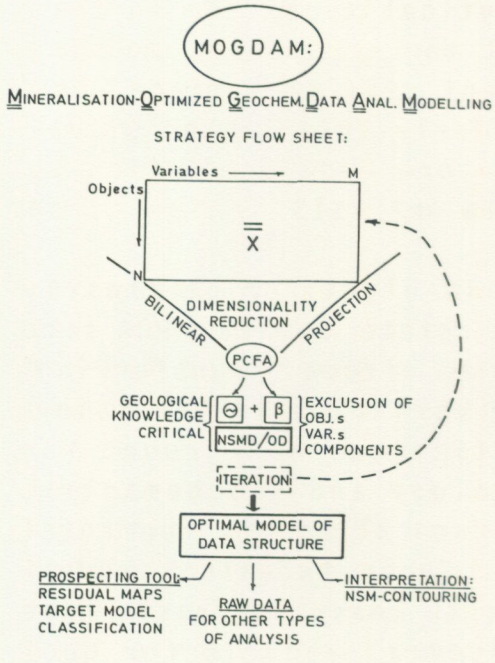


Fig.13.

COMPLEMENTARY

PaRC + PaC

TECHNIQUES FOR

GEO CHEMICAL

DATA

ANALYTICAL

MODELLING

FADA

FACTOR ANALYSIS

DISCRIMINANT ANALYSIS

(PaRC)

MOGDAM

MINERALISATION

OPTIMIZED

GEOCHEMICAL

DATA

ANALYTICAL

MODELLING

(PaC)

Fig.14.

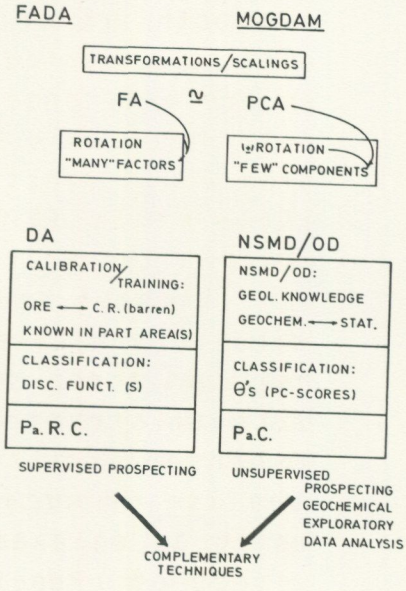


Fig.15.

possible from the known ores (barren C. R.´s). This constitutes a training, or supervision, step of the FADA approach, for which there is no direct equivalent in the MOGDAM strategy. The MOGDAM procedure instead is critically dependent on the NSMD/OD step, which requires a certain amount of rather integrated geological knowledge pertaining to the geological problem at hand.

Thus the FADA approach can be viewed as developed for the supervised prospecting geochemical data analysis situation, to be complemented by the MOGDAM exploratory geochemical data analysis strategy for more open propecting situations. Their relative merits are clear: at the price for the need of a priori knowledge (training), the FADA achieves the optimal resolution of the geochemical data representations - by way of contrast, the MOGDAM strategy can extricate the same essential information, at a relatively more coarse resolution, but without any a priori geological knowledge like the DA prerequisites.

Other formalisations of somewhat similar statistical procedures for use in exploration geochemistry have been published recently. A relative to the present sulphide aureole MOGDAM version would be the ternary map procedure of Sinding-Larsen & Strand (1981), directed towards detecting massive sulphide deposits in Norway. Another regionalized multivariate approach to target selection using Characteristic Analysis has been proposed by Botbol et al. (1978). Both these strategies formalise the aspect of geology - statistics interaction around regional (geographical) cell definition optimally reflecting mineralized areas and both are of the supervised data analytical type.

AFTERMATH: FUTURE OF

EXPLORATION GEOCHEMISTRY DATA ANALYSIS

We have here only referred to the one-block PCA of closely similar variables. Programs exists that relate similar PCA´s on two, or more, such blocks of variables, in effect "transferring" as much structure from the one block of variables to the other. Esbensen at al. (1983) describe the statistical background for the use of such two-block models in geology and geochemistry, using as an example correction for the so-called environmental effect of organic sediment geochemistry. These two-block modelling methods, which are called PLS (Partial Least Squares), have also been used as a basis for a more general vehicle for geochemical data modelling called SELPLS (SELective PLS), the general strategy of which runs much the same as that of (MO)GDAM, ibid.

Another illustration of the geochemical applicability of the SIMCA and PLS approaches has been given by Bisani et al. (1983), who discuss the relative information inherent in the major element vs. the trace element blocks of a suite of basaltic volcanics exhibiting an extended magmatic fractionation series.

Recently at the Chemometrics Research Group we has performed the first PLS-analysis on combined whole-rock geochemical and petrophysical data (one variable block being a "normal" geochemical variable suite, the other petrophysical block comprising such variables as density, magnetic susceptibility, remanence and Q-ratio). These investigations are carried out in collaboration with Dan Nisca, SGAB and Karl-Magnus Drake, SGU/SU. Preliminary results are encouraging. It would appear that for typical Swedish **serorogenic** granitoids the systematic information (data structure) present in either the geochemistry block or the geophysical block of variables can be predicted from any one block to an extent of ca. 75 % of the total data variance in either block alone. The implications for such a concurrence between geochemical and petro/geophysical "viewpoints" of these types of alternative information present in the same rock samples are very promising.

Scenarios of application of this type of "transfer"-models include the possibility of "translating" airborne geophysical map information to an equivalent petrophysical map pertaining to ground level data, which in its turn can be further translated into a comparable geochemical map, all within the limits of the efficiency and accuracy of the necessary calibrated basic two-block PLS reference studies (this type of PLS-modelling needs a calibration/training stage for obvious reasons). If the preliminary results hold, the "transfer efficiency" of 75 % from one block to another would result in a compound two-step transfer still better than to 50 % transfer efficiency. Perhaps these large inherent "errors" can be tolerated for two reasons:

i) although accuracy of say, $\pm$ 50 % relative would appear sloppy in any direct analytical geochemical context, the internal covariance between variables would be better by far, because of the covariance-stabilized PCA and PLS methods. One would probably only be able to "translate" into the type of covariance-determined components presented in Fig.s 4 & 7 above. These, however, would certainly still be of very great geochemical and geological interest. It might even under favourable circumstances be possible to predict certain key individual variables, e.g. SiO_2, MgO, FeO etc. together with strongly correlated trace elements !

ii) Such "translated" geophysical-geochemical maps of course would be of prime interest in survey work, in which the reduced accuracy probably would be more than compensated for by considering the effective price per area covered (airborne geophysics as related to a ground-based geochemical survey inclusive analytical efforts). The operative costs of such survey "geocehmical" data of course would be dramatically small and the time dependency of the translation procedure is vitually nil, once the calibration work has been laid down once and for all for geologically meaningful homogenous areas of regional scale.

ACKNOWLEDGEMENTS

Discussions of the ideas in this paper on various occasions with Karl-Magnus Drake, Erik Johansson, Dan Nisca, Lennart Lindquist and Olle Selinus were very valuable. The latter also kindly allowed part of his Stollberg data set to be used herein for which we are very grateful.

REFERENCES

Albano, C., Blomquist, G., Coomans, D., Dunn III, W., Edlund, U., Eliasson, B., Hellberg, S., Johansson, E., Nordén, B., Sjöström, M., Söderström, B., Wold, H. and Wold S. (1981) PATTERN RECOGNITION BY MEANS OF DISJOINT PRINCIPAL COMPONENT MODELS (SIMCA). PHILOSOPHY AND METHODS. in proceedings "Symposium i Anvendt Statistik 1981 (Höskuldsson, Conradsen, Jensen & Esbensen, Ed.s), p.183-218.

Bisani, M.L., Clementi, S., Fairone, D. Esbensen, K.H. and Wold, S. (1983) PRINCIPAL COMPONENTS AND PARTIAL LEAST SQUARES ANALYSIS OF THE GEOCHEMISTRY OF VOLCANIC ROCKS FROM THE AEOLIAN ARCHIPELAGO. Analytica Chimica Acta (Computer Techniques and Optimization). (in press)

Botbol, J.M., Sinding-Larsen, R., McCammon, R.B. and Gott, G.B. (1978) A REGIONALIZED MULTIVARIATE APPROACH TO TARGET SELECTION IN GEOCHEMICAL EXPLORATION. Economic Geology, vol 73, p. 534-546.

Carrol, J.B. (1961) THE NATURE OF THE DATA OR HOW TO CHOSE A CORRELATION COEFFICIENT. Psycometrica, vol. 26, No. 4, p.347-372.

Esbensen, K.H., Johansson, E., Drake, K.-M. and Wold, S. (1983) RECOGNISING POLYGENETIC GEOCEHMICAL DATA PATTERNS BY MULTIVARIATE SOFT BILINEAR MODELLING USING SELECTIVE PARTIAL LEAST SQUARES TECHNIQUES (SELPLS). in "Symposium on Applied Statistics, jan. 26-27, 1983. Copenhagen" (Ed.s Höskuldsson and Edwards), p. 111-132.

Jöreskog, K.G., Klovan, J.E. and Reyment, R.A. (1976) GEOLOGICAL FACTOR ANALYSIS. Elsevier, Amsterdam.

Jöreskog, K.G. and Wold, H. (1982) THE ML AND PLS TECHNIQUES FOR MODELLING LATENT VARIABLES - Historical and Comparative Aspects. in SYSTEMS UNDER INDIRECT OBSERVATION - CAUSALITY, STRUCTURE, PREDICTION, Vol. I. (Jöreskog & Wold, H. Ed.s) p.263-270. "Contributions to Economic analysis, Vol. 139". North-Holland, Amsterdam.

Kruskal, J.B. (1978) FACTOR ANALYSIS AND PRINCIPAL COMPONENTS - BILINEAR METHODS. in "International Encyclopedia of STATISTICS, Vol 1" (Kruskal & Tanur Ed.s), p.307-330. Macmillan Press, New York.

Lindquist, L. (1976) SELLO, A FORTRAN IV PROGRAM FOR THE TRANSFORMATION OF SKEWED DISTRIBUTIONS TO NORMALITY. Computers and Geosciences, vol. 1, p.129-145.

Sinding-Larsen, R. and Strand, G. (1981) QUANTITATIVE INTEGRATION OF MINERAL EXPLORATION DATA: A CASE STUDY OF THE GRONG MINING REGION OF NORWAY. Episodes, vol. 1 (1981), p.9-12.

Selinus, O. (1981) LITHOGEOCHEMICAL EXPLORATION DATA IN SULPHIDE PROSPECTION IN NORTHERN SWEDEN. Jour. Geochem. Explor., vol. 15, p.181-201.

Selinus, O. (1983) MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSIS IN GEOCHEMICAL PROSPECTING, AS APPLIED TO AN AREA IN CENTRAL SWEDEN.
Jour. Geochem. Explor. (in press).
Also unpublished STU-report; see Selinus (present volume) for detailed reference.

Stephens, M.B. (1980) SPILITIZATION, ELEMENT RELEASE AND FORMATION OF MASSIVE SULPHIDES IN THE STEKENJOKK VOLCANITES, p. 159-193.

Stephens, M.B. (1982) FIELD RELATIONSHIPS, PETROCHEMISTRY AND PETROGENESIS OF THE STEKENJOKK VOLCANITES, CENTRAL SWEDISH CALEDONIDES. Sver. Geol. Unders. C786, 1982. 105p.

Wold, S. (1976) PATTERN RECOGNITION BY MEANS OF DISJOINT PRINCIPAL COMPONENT MODELS. Pattern Recognition, Vol. 8, p. 127-139.

Wold, S. (1978) CROSS-VALIDATORY ESTIMATION OF THE NUMBER OF COMPONENTS IN FACTOR AND PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS. Technometrics, Vol. 20, p. 397-405.

Zachrisson, E. (1982) SPILITIZATION, MINERALISATION AND VERTICAL METAL ZONATION AT THE STEKENJOKK STRATA-BOUND SULPHIDE DEPOSIT, CENTRAL SCANDINAVIAN CALEDONIDES. Trans. Instn. Min. Metall. (sect. B: Appl. Earth Sci.), vol. 91 (1982). p.192-199.

BERGGRUNDSGEOKEMI INOM LKAB; UNDERSÖKNINGAR OCH FÖRVÄNTNINGAR

Stig Bjurstedt
LKAB Prospektering AB
S-771 00 Ludvika

Inledning

Avsikten med detta föredrag är att till forskare och andra, vilka arbetar direkt med utveckling av berggeokemisk metodik, förmedla en uppfattning om hur vi som prospekteringsorganisation betraktar ämnesområdet. Jag kommer även att, som exempel på våra insatser, lämna kortfattade kommentarer till några av de blygsamma arbeten vi hittills utfört eller stött.

LKAB Prospektering AB (Prospab) är ett relativt ungt bolag, bildat 1977. Prospab vill även förbli ett ungt företag med vakenhet för moderna idéer och möjlighet att snabbt anpassa verkasmheten till ny teknik och metodik.

Policy

Resurstilldelningen internt sker efter behovsprövning och hård prioritering av detaljerat preciserade budgetförslag. Företagets behov av viss metodik styrs av den grundläggande policyn för företaget. Prospabs hittillsvarande policy och prospekteringsuppläggning kan kortfattat uttryckas i några få punkter nämligen

- att utföra fullprospektering; d v s alla ekonomiskt intressanta mineral söks, exempelvis legeringsmetaller, basmetaller, ädelmetaller, sällsynta jordartsmetaller, industrimineral, energimineral
- att i områdeshänseende dels koncentrera insatser till områden av vikt för koncernens driftsanläggningar i Norrbotten och Bergslagen dels prioritera mellan områden för nyprospektering och nyetablering. Detta sker med hjälp av koncernens expertis på grund av geologiska och andra kriterier, där även tekniska och marknadsmässiga bedömningar vägs in.

En sådan policy innebär, vad gäller berggrundsgeokemisk metodik, att ett brett spektrum av kemiska element är av intresse och dessutom att generella metoder för genetisk, stratigrafisk och litologisk tolkning är värdefulla.

För Prospabs verksamhet bedöms därmed den senaste tidens och den närmaste framtidens geokemiska utveckling som mycket intressant. Vi försöker därför beakta möjligheterna att utnyttja och själva medverka till utvecklingen av den berggrundsgeokemiska metodiken.

Analysresurser

Inom koncernen finns resurser för analysering vid laboratorier i Kiruna, Malmberget, Yxsjöberg samt på Prospabs lab. i Stockholm, där huvudsakligen ICP-utrustning kommer till användning. För närvarande sker ett byte till andra generationens plasmautrustning. Detta medför att bakgrundsvärden för de flesta spårelement i normala bergarter kan detekteras. Speciella analyser läggs ut på externa laboratorier. Analyskapaciteten med 6 personers bemanning uppgår till ca 35000 prov per år. Självkostnaden per mineralt prov är vid standardförfarande 110 kr/prov. Endast sporadiska insatser utförs i analysmetodikhänseende med avseende på specifikt berggeokemisk inriktning, dock är utvecklingsarbeten för "vanliga" geokemiska prov ofta tillämpbar även för berggeokemiska analyser. Därvid kan nämnas att anpassningar av metodik för noggrann och relativt billig bestämning av Sn, Nb och Ta utförts.

Tillämpning; egna arbeten

Vad det gäller tillämpning av berggeokemisk metodik som prospekteringsmetod är Prospabs egna insatser hittills blygsamma, om man endast beaktar sofistikerad metodik. Man bör emellertid inte glömma, att ett prospekteringsbolags omfattande insatser i fråga om borrning och normal malm- och berggrundsanalysering även är en berggeokemisk metodik. Ett förbättrat utnyttjande av det dyrbara material som borrkärnorna utgör torde vara en väsentlig punkt för framtida utveckling. Förutom det mer rutinbetonade arbetet i anslutning till borrning lägger Prospab f.n. tonvikten på bevakning av litteratur, symposier, möten och kontakter med institutioner och forskare i avsikt att snabbt kunna ta nya rön i bruk.

I egen regi har endast arbeten i direkt anknytning till malmobjekt utförts. Följande förteckning visar några arbeten med varierande berggeokemisk karaktär, vilka utförts av Prospab.

BERGGEOKEMISKA UNDERSÖKNINGAR UTFÖRDA AV PROSPAB

Berggrundsanalyser

Spårelementprofiler över leptitserien

Preliminära studier av Re-Mo kvoten i molybdenglans som prospekteringshjälpmedel

Separering och spårelementanalys av glimmermineral, bedömning och inledande försök

Studier av huvud och spårelementfördelning i anslutning till scheelitmineraliseringar

Kemisk-mineralogisk undersökning av skarn i anslutning till scheelitmineraliseringar

Fullständiga eller partiella berggrundsanalyser har i begränsat antal utförts på dels typbergarter dels malmspecifika varieteter. Dessa analyser är i allmänhet ej publicerade. Spårelementanalysering av valda profiler i anslutning till malmer och mineraliseringar i Bergslagen har utförts i avsikt att erhålla jämförelsevärden för fortsatta arbeten och i första hand för att ge genetisk information. Resultaten föreligger endast i interna rapporter. Dessa insatser exemplifierar för prospekteringsändamål sedan långt tillbaka normalt tillämpade arbeten.

Några preliminära insatser av utvecklingskaraktär har även utförts. Försök med bestämningar av Re/Mo-förhållandet i molybdenglans i några svenska molybdenmineraliseringar har utförts. Därvid har konstaterats att Re-halten i de svenska mineraliseringarna vanligen är relativt hög, vilket kan ha viss betydelse då rhenium är ett ekonomiskt attraktivt element. Möjligheten att utnyttja den temperaturberoende kvoten i prospekteringssyfte för att lokalisera den primära mineraliseringskällan kräver emellertid ett omfattande, systematiskt fortsatt arbete för att eventuellt kunna utvecklas till färdig metodik.

Försöken att utnyttja separerade glimrar för prospektering har påbörjars främst med sikte på den typ av Sn, Li, Ta-mineraliseringar, som undersöks av Prospab i Västernorrland. Om en effektiv och enkel separeringsmetodik kan uppnås, är det emellertid vår avsikt att även pröva metodiken mer allmänt.

Vissa av Prospab utförda arbeten har varit knutna till specifika mineraliseringstyper, varvid scheelitmineraliseringar naturligt nog fått den största uppmärksamheten, då koncernen driver landets enda scheelitgruva i Yxsjöberg. Elementfördelningsstudier samt kemisk-mineralogiska undersökningar av skarn är delvis publicerade av Lars-Göran Ohlsson, andra förbereds för publicering och visst material föreligger i interna rapporter.

Resultat från analysering av berggrundsprov i anslutning till såväl rutinmässiga som utvecklande anrikningsförsök och annan verksamhet inom koncernens gruvförvaltningar och dotterbolag bidrar även med viktig information, som delvis kan utnyttjas i prospekteringssammanhanget. Som exempel på sådana arbeten kan nämnas de omfattande studier av sällsynta jordartsmetallers och andra spårelements förekomst i järnmalmer och bergarter i kirunaområdet, vilka utförts och publicerats av Tibor Parak. Ett annat värdefullt arbete är en studie av provfördelnings- och provvolymsoptimering, vilken utförts av Stefan Månsson, AB Statsgruvor.

Tillämpning; stöd till projekt

Prospab har en allmänt forsknings- och utvecklingsvänlig inriktning om än de egna resurserna är knappa. Vi har därför i möjligaste mån stött forskningsprojekt initierade av andra. Stödet har i några få fall skett med direkt penningtillskott. I många fall har extra eller visstidsanställning av forskare som arbetat med sitt utvecklingsarbete kunnat ordnas. Dessutom försöker företaget alltid medverka till att ställa provmaterial och kartunderlag till förfogande för forskningsändamål. Den följande förteckningen visar några exempel på forskningsprojekt som i en eller annan form stötts. Förteckningen gör inte anspråk på att vara komplett.

BERGGEOKEMISKA UNDERSÖKNINGAR STÖDDA AV PROSPAB

Litogeokemisk Malmprospektering Sn, W, Mo i svenska granitoider

Berggrundsgeokemi Stollbergsfältet

Granit och gnejsplutonernas dynamiska utveckling

Isotopstudie av karbonatbergarter

Utveckling av portabelt XRF - instrument för vanadinbestämning

Geochemistry of skarn deposits at Yxsjöberg and Wigström ...

Mineralkemiska undersökningar av Siggeboda Zn, Pb, Ag - malm och greisenmineralisering vid Van

Kemisk malmmiljö - Bergslagen

Med anledning av koncernens speciella intresse för wolfram föll det sig naturligt att stödja de senare faserna av den litogeokemiska undersökningen med särskild hänsyn till Sn, W och Mo i svenska granitoider, vilken initierats vid Stockholms Universitets geologiska institution. Det har vid Prospabs arbeten visat sig att mineraliseringar av greisentyp förekommer i den svenska berggrunden. En fortsatt utveckling av den i projektet använda metodiken är därmed ytterligare motiverad. Metodiken kan självfallet tillämpas i sin nuvarande form, dock torde bättre underlag för bedömning av lämplig provtäthet och provstorlek samt analysnoggrannhet och reproducerbarhet erfordras, innan metodiken kan nå genomslagskraft. De hittills erhållna resultaten utgör ett utmärkt referensmaterial vid fortsatta arbeten. Principen att datalägga resultaten tillsammans med koordinater för provpunkterna kan tjäna som föredöme för andra berggeokemiska arbeten. Här finns ej möjlighet gå in på alla de intressanta aspekter som framkommit i arbetet. Ett delresultat ter sig emellertid så väsentligt att det bör kommenteras, då det ej direkt framgår av publikationerna. Studien har visat att vissa granitoider är förhöjda med avseende på malmelementen Sn, W och Mo. Går man emellertid in på enstaka prov inom dessa graniter eller åtminstone vissa av dessa graniter,

såsom ex.vis mineraliserat testområde II, Yxsjöberg, finner man ingen eller snarast en negativ korrelation mellan W och Mo å ena sidan och Sn å andra sidan. Detta resultat sammanfaller med erfarenheter från Prospabs egna arbeten. Det tyder på en differentiation av stor vikt att beakta vid prospektering i dessa områden och speciellt vid statistisk bearbetning av analysresultat med tillämpande av metodiken.

Den berggrundsgeokemiska undersökningen av Stollbergsfältet har stötts av AB Statsgruvor i avsikt att direkt erhålla information för utsättning av borrhål i samband med de sista försöken att finna malmtillskott för gruvan. Arbetet har givit det intressanta resultatet att till synes intetsägande råvärden med hjälp av statistisk bearbetning kan omformas för att påvisa haloförhållanden över mer än en kilometers stratigrafisk bredd från kända malmkroppar. Metodiken förutsätter att man utgår från något känt malmläge, vilket utgör mall för bearbetningen. Huruvida resultaten från Stollbergsfältet och andra kända fält kan användas som utgångsmallar även för prospektering i andra områden återstår att bevisa. Försök i detta avseende är angelägna.

Vid Uppsala universitet pågår projektet "Granit och gnejsplutonernas dynamiska utveckling ....". Projektet, till vilket Prospab medverkat med kart- och provmaterial, utgör exempel på en studie där berg-och mineralkemiska parametrar ställs i relation till tektoniska förhållanden. Arbeten i detta avseende har hittills huvudsakligen skett under laboratorieskala. Studier av faktiska fältförhållanden torde väsentligt kunna bidra till vår grundläggande kännedom om de geologiska förloppen.

Isotopstudier har under senare år fått allt större gehör såväl i geologiskt grundforskningssammanhang som i prospekteringsavseende. I samband med att ny utrustning anskaffades till laboratoriet för isotopgeologi i Stockholm utfördes en preliminär undersökning av kol- och syreisotopsammansättningen i valda malmassocierade karbonatstenar i Bergslagen. Resultatet inbjuder till fortsatta insatser då distinkta skillnader mellan olika malmfält kunde påvisas.

I samband med undersökningar av vanadinmalmen i Kramsta framkom behov av ett instrument för snabb, halvkvantitativ bestämning av V i stuffer och borrkärnor. Genom stöd till ett påbörjat utvecklingsarbete vid AB Refina har ett portabelt XRF-instrument med för ändamålet tillfredsställande funktion framtagits. Instrument finns numera i en version för försäljning.

Det nyligen publicerade mastersarbetet "Geochemistry of skarn deposits at Yxsjöberg and Wigström" och ett pågående examensarbete med mineralkemiska undersökningar av Siggeboda- och Vanmineraliseringarna utgör exempel på direkt objektanknutna, mindre arbeten, som med fördel kan utföras vid geologiska institutioner. Kvalitén på dylika arbeten blir självfallet av mycket varierande grad och resultaten måste bedömas med urskiljning.

Det sedan några år tillbaka vid Lunds universitet pågående projektet "Kemisk malmmiljö-Bergslagen" tillhör en typ av insatser som förtjänar allt stöd. För en prospekteringsorganisation är det tyvärr ofta svårt att till finansiärerna motivera behovet av medel för dylika insatser av grundläggande karaktär, även om den långsiktiga betydelsen därav i prospekteringshänseende är uppenbar. Vår medverkan måste därför inskränka sig till att ställa kartunderlag samt prov och borrkärnsmaterial till förfogande. I detta sammanhang kan även nämnas vikten av att det planerade borrkärnsarkivet för Bergslagen inom en snar framtid kan komma i aktivt bruk.

Utvecklingsstadier

Allmänt kan sägas att företagets möjlighet medverka i skilda FoU-projekt är beroende av hur nära tillämpningsstadiet en metod nått. F.n. är Prospabs bedömning att ytterst få berggrundsgeokemiska metoder kan betraktas som etablerad metodik i prospekteringshänseende.

UTVECKLINGSSTADIER
berggrundsgeokemisk metodik

		finansiering
– grundforskning		NFR, STU, Bolag
– teststadie		STU, NFR, Bolag
– tillämpning	a) försöksverksamhet	Bolag, STU
	b) etablerad metodik	Bolag

Grundforskningsstadiet innebär en förutsättningslös faktainsamling, analys av fakta, uppställande av hypoteser samt formulering av möjliga tester för att verifiera hypoteserna. Då smärre försök visat positivt resultat övergår verksamheten i teststadiet, där mer detaljerat planerade och kostnadsberäknade delstudier och/el. case studies av större omfattning krävs för att erhålla en komplett metodik. Då metodbeskrivning utformats är tiden mogen för något fullskaleförsök under normala arbetsförhållanden och utfört av ej specialutbildad arbetskraft. Ofta erfordras försök i flera skilda miljöer och under de normalt varierande omständigheter, som kan uppstå vid en regelbunden tillämpning, vilken förhoppningsvis blir slutsteget. Under detta återstår endast förfining av en fullt användbar och ekonomiskt försvarbar metod. Prospabs ekonomiska satsning på berggrundsgeokemi i grundforskningsstadiet är f.n. helt obetydlig. I teststadiet utförs ca 5 försök/år i storleksordningen 20 kkr/st. Av tillämpad försöksverksamhet pågår i medeltal 1-2 projekt/år i storleksordningen 100-300 kkr. Användning av etablerad berggeokemisk metodik ligger i storleksordningen några hundratusen kronor per år. I allt således omkring en halv miljon kronor per år.

Målsättning

Den berggeokemiska metodiken kan betraktas ur olika aspekter. Jag vill försöka att med hjälp av några enkla uppställningar redovisa Prospabs inriktning i förhållande till dessa utgångspunkter.

MÅLSÄTTNING

för berggeokemiska studier vid prospektering

— tolka genetiska förhållanden

— ge stratigrafisk information

— påvisa malmpotentiella haloförhållanden

— erhålla "pathfinder element" karaktäristisk

— erhålla direkt malmelement karaktäristik

Uppenbart kan berggeokemisk metodik användas för skilda målsättningar. Prospab betonar insatser mot de direkt malmkaraktäristiska förhållandena såsom halotrender och specifika elementassociationer.

Provtyper

För uppfyllandet av skilda målsättningar kan skilda provtyper utnyttjas, varvid vi f.n. anser användande av separerade mineral som en intressant, relativt outforskad gren.

PROVTYPER
för berggeokemisk prospektering

- specifika, renseparerade mineral
- bergartsprov
- malmprov

Provpositioner

De använda provtyperna kan tas från skilda provpositioner.

PROVPOSITIONER
för berggeokemisk provtagning

- i lösa avlagringar
- i blottad bergyta
- i bergyta täckt av lösa avlagringar
- i djupprov
  (borrkax, borrkärna, in situ analys i bh)

I detta hänseende har Prospab ägnat betydande insatser åt att, i samarbete med entreprenörer, utveckla metodik och utrustning för provtagning i berg-yta under mäktiga lösa avlagringar. Att kunna åstadkomma en sådan provtagning till ett rimligt pris torde vara en kritisk förutsättning för att berggrundsgeokemin som regional prospekteringsmetod skall kunna få en vid tillämpning. Vissa framsteg har nåtts men väsentliga förbättringar torde snabbt kunna uppnås om utvecklingsinsatserna kunde intensifieras. Detta bedömer vi som mycket väsentligt.

Analysmetoder

Ett erhållet prov kan analyseras på skilda sätt.

ANALYSMETODER
för berggeokemiska bestämningar

- visuellt urskiljande av bergart eller mineral
- enkla "spot tests", UV-lampa och liknande
- konventionell lab analys (AAS, XRF, OES, våtkem m m)
- extremt noggranna lab bestämningar (masspektrometer, neutronaktivering m m)

Den snabba utvecklingen i fråga om instrumentell analysering har under de sista åren öppnat helt nya och fascinerande prospekteringsmöjligheter. Det är dock önskvärt att metodiken för felkontroll och felkorrigering hänger med i utveckling. Där finns nu brister. Vidare vore det önskvärt att framställa ett antal välpreparerade standardprov av nordiska bergarter i en volym som räcker för lång tids användning. Man bör i hänförelsen över instrumentutvecklingen inte glömma att enkla, fältmässiga bestämningar med kemiska reagens, UV-lampa m.m. i många avseenden kan vara fullt tillfredsställande och mycket billiga metoder. Ytterligare utveckling av sådana metoder är inte oväsentlig. Prospab har därvid gjort vissa arbeten, speciellt vad gäller standardisering av halvkvantitativ metodik för UV-belysning av scheelitprov.

Arbetsmoment

Arbetsgången vid berggeokemisk prospektering kan indelas i skilda arbetsmoment.

ARBETSMOMENT
vid berggeokemisk prospektering

- val av projekt
- avgränsning av område
- optimal spacing av provpunkter
- provtagning
- provberedning
- analysering
- bearbetning av analysvärden
- visualisering
- relatering till geologi, geofysik m m
- bedömning och rekommendation

Samtliga arbetsmoment är viktiga. Vid val av projekt och avgränsning av undersökningsområde är tillgången till geologiska kartor av tillräckligt detaljerad och god kvalitet en ofta avgörande faktor. För samtliga arbetsmoment gäller att en rimlig kostnad måste uppnås. Det torde i dagens läge vara möjligt att utföra de flesta momenten till ett sådant pris att berggeokemisk metodik kan vara ett seriöst alternativ och i speciella fall den enda möjliga metodiken för en viss målsättning. De enda kritiska momenten synes f.n. vara att kunna erhålla prov av tillfredsställande kvalitet med en sådan fördelning att tillräckligt detaljerad styrning av fortsatta arbeten kan resultera. Utvecklingsinsatser i detta avseende har enligt vår mening högsta prioritet.

För ett prospekteringsbolag är de senare faserna av arbetet mer väsentliga än vad forskaren alltid har klart för sig. Att bearbeta och åskådliggöra resultaten så att även icke specialisten kan tillgodogöra sig informationen på ett fullständigt och rättvisande sätt kan vara en grannlaga uppgift.

Berggrundsgeokemiska resultat i prospektering

utgör

UNDERLAG för **BESLUT**

Den samlade berggeokemiska insatsen skall i prospekteringssammanhanget utgöra ett underlag för kanske mycket stora fortsatta insatser och måste därmed behandlas omdömesgillt samt utsättas för konstruktiv kritik. Om så blir fallet tror vi att den berggrundsgeokemiska metodiken inom kort kan få ett genombrott som prospekteringsteknik.

PROSPEKTERINGSSTRATEGI FÖR OPTIMAL PREDIKTION AV GRANITOIDERS MINERALISERINGSPOTENTIAL

Karl-Magnus Drake
Stockholms Universitet, Geologiska Institutionen
106 91 STOCKHOLM

Regional berggrundsgeokemi - en eftersatt prospekteringsteknik i Sverige.

Ett väsentligt ökat intresse har under senare tid uppstått i Sverige för prospektering efter de betydelsefulla legeringsmetallerna Sn, W, Mo, Nb och Ta. Nya mineraliseringstyper av dessa metaller, mer eller mindre associerade med granitdomer och pegmatitiska kroppar, har upptäckts från Bergslagen i söder till Norrbotten i norr de sista fem åren.

Det förekommer emellertid av konfidentiella eller andra skäl ingen eller mycket lite officiell statistik över vilka typer av prospekteringsmetoder som ursprungligen användes för att lokalisera mineraliseringsupplagen. Jag vågar dock påstå att regional berggrundsgeokemisk teknik hittills inte använts av något prospekteringsbolag i Sverige vid systematiskt sökande efter Sn-W-Mo-mineraliserade granitdomer. Trots att såväl viktiga geokemiska basfakta (Armands och Drake, 1978; in press; Drake, 1981) som nödvändigt geologiskt-geofysiskt prospekteringsunderlag beträffande granitoider nu föreligger i regional skala över stora delar av mellersta och framförallt norra Sverige måste man alltså tyvärr fortfarande konstatera att inga prospekteringsarbeten har igångsatts inom regional berggrundsgeokemi. Viktiga utvecklingsarbeten inom ovannämnda metodområde i utlandet (Govett, 1983) och i Sverige (Armands och Drake, 1978; in press; Drake 1981 och Selinus, 1983) samt positiva erfarenheter från denna tekniks användning vid lokal och regional prospektering i ett flertal länder (Govett, 1983 och Drake, 1981) verkar ej heller kunna övertyga svenska prospekteringsbolag att seriöst satsa på

i första hand regional berggrundsgeokemi vid metallogenetisk undersökning av granitoider.

Förhoppningsvis kan ledamöterna inom de tre expertgrupper, vilka industriministern nyligen har tillsatt för att sätta fart på svensk gruvindustri, påverka berörda myndigheter och gruvbolag att ekonomiskt stödja den i förhållande till andra prospekteringsmetoder helt eftersatta regionala berggrundsgeokemiska prospekteringstekniken.

Att döma av det stora intresset som rönts för detta första svenska berggrundsgeokemiska symposium samt genom STU:s rejäla satsning på teknikutveckling för djupprospektering kommer säkert berggrundsgeokemin såsom prospekteringsteknik att till sist få en chans att visa sin inneboende styrka såväl i regionala som lokala undersökningssammanhang.

Målsättning samt strategins fyra undersökningsfaser

Mitt syfte med detta symposiebidrag är i första hand att presentera ett förslag till prospekteringsstrategi uppdelad i fyra undersökningsfaser, för optimal prediktion av granitoiders mineraliseringspotential.

I en inledande fas (nr 1) är det av största vikt att grundligt analysera tillgängliga prospekteringsdata, på basis av bl.a. globala kriterier kännetecknande mineraliseringspotentiella granitoider, innan tidskrävande och kostsamma geologiska fältarbeten och berggrundsgeokemisk provtagning utförs.

Vid tillämpning av regional berggrundsgeokemisk prospektering (fas nr 2) bör inledningsvis moment såsom optimering av provtagningssystem, provstorlek, provberedningsförfarande och kontroll av analyskvalité kritiskt utvärderas. Erhållna geokemiska och andra data över undersökta granitoider bör sedan integreras i ett datorbaserat geodataarkiv för rationell lagring och hantering i samband med efterföljande multivariat statistisk analys.

Undersökningsfas 3 omfattar alltså modern multivariat dataanalys och tolkning av regionala geologiska - geofysiska - geokemiska prospekteringsdata i syfte att urskilja granittyper med hög mineraliseringspotential, vilken främst är baserad på granittypernas geokemiska karaktär. Då Esbensen och Wold samt Selinus (denna volym) och Esbensen et al. (1983) diskuterar olika moderna multivariata statistiska metoders användning inom geokemisk prospektering och kartering ger jag endast en kort orientering om de multivariata "pattern recognition" - eller analogi-analys-programmen SIMCA och MACUP. Dessa program har genomgående använts vid de olika geokemiska granitstudier, vilka presenteras dels i detta arbete och dels i Esbensen och Wold (denna volym).

Undersökningsfas 4 slutligen syftar till att med hjälp av olika typer av mineralogisk och mineralkemisk analys av granitoiders tungmineralfaser diskriminera mellan granitoider med hög mineraliseringspotential och Sn-W-Mo-Nb-Ta-mineraliserade granittyper. De senare bör sedan naturligtvis undersökas i detalj för att lokalisera eventuella mineraliseringar av ekonomiskt intresse.

I anslutning till de fyra ovannämnda faserna kommer jag att kortfattat presentera en del egna resultat från regionala berggrundsgeokemiska granitstudier inom pågående eller redan avslutade STU-projekt, vilka alla har direkt anknytning till föreslagen prospekteringsstrategi.

Avslutningsvis illustreras strategin i form av ett flödesschema och därefter ges några rekommendationer till problemområden, vilka i första hand kräver fortsatta metodik- och optimeringsstudier för att strategins alla faser skall kunna utvärderas på ett tillfredsställande sätt.

Undersökningsfas 1: Metallogenetisk utvärdering av tillgängligt prospekteringsunderlag

Ett första steg i ett inledande regionalt prospekteringsarbete är naturligtvis att kritiskt granska resultat från allt tillgängligt faktaunderlag i berörd undersökningsregion (dvs information från

t.ex. satellit- och flygbilder, regionalgeofysik och geologisk kartering). I ett område där man aldrig tidigare lokaliserat eller prospekterat efter Sn-W-Mo-mineraliserade granitoider saknas ofta relevanta geologiska - geofysiska- geokemiska data och hypoteser, vilka kan underlätta val av lämpliga geologiska miljöer eller strukturer där sådana granitmassiv kan tänkas förekomma.
Tidigare erfarenheter från dokumenterade metallogenetiska studier av granitoider kan då utnyttjas för att i det egna undersökningsområdet välja ut granitiska miljöer, vilka har störst sannolikhet att vara malmproduktiva enligt global jämförelse.
Framförallt bör olika typer av information från flyggeofysiska mätningar användas vid identifiering av storregionala berggrundsstrukturer och olika bergartsenheter, vilka ej går att upptäcka vid geologisk kartering på grund av låg blottningsgrad av berggrunden och förekomst av mäktiga glaciala avlagringar.
Gravimetrisk information ger dessutom möjlighet att erhålla en tredimensionell tolkningsbild av undersökningsområdets granitoidkroppar i motsats till den tvådimensionella geologiska kartbilden.

Arbeten i Kanada (Chatterjee och Muecke, 1982) och i Australien (Yeats et al., 1982) visar att flyg- och markburen gammastrålningsspektrometri är en mycket användbar teknik för att lokalisera såväl potentiellt U- som Sn-W-mineraliserade granitoider.
I fig. 1 framgår att ett flertal svenska Sn-W-Mo-anomala granittyper (Drake, 1981) även uppvisar förhöjd gammastrålning, vilken har registrerats i samband med radiometrisk flygmätning över motsvarande granitområden (Wilson och Åkerblom, 1981).

Granitmassiv associerade med Sn-W-Mo-mineraliseringar i Sibirien karakteriseras i allmänhet av lokala negativa gravimetriska anomalier (Dukhovskiy, 1982). Däremot skiljer sig de sibiriska W-Mo- och W-Sn-mineraliserade åt i avseende på deras magnetiska egenskaper (de förra är starkt magnetiska och de senare är svagt eller icke magnetiska). Jämförelse mellan preliminära resultat från regionala flygmagnetiska och gravimetriska data över Skandinavien (Eriksson och Henkel, 1980) och geokemiska data över svenska granitoider (Drake, 1981) antyder att ett flertal potentiella Sn-W-Mo-mineraliserade granitoider i Sverige utmärks av geofysiska egenskaper kännetecknande sibiriska granitoider.

En effektiv integrering samt en kritisk utvärdering av tillgänglig basinformation medför alltså att malmprospekteringskostnader kan reduceras avsevärt genom att i ett tidigt skede välja ut endast granitområden med karakteristiska geologiska - geofysiska mineraliseringssignaliment, där sedan berggrundsgeokemisk undersökningsteknik kan tillämpas.

I de fall där granitiska berggrundsprover redan föreligger i ett undersökningsområde (i samband med t.ex. mätningar av petrogeofysiska parametrar såsom täthet, magnetisk susceptibilitet och remanens) bör detta provtagningsmaterial även kunna användas vid olika typer av översiktliga berggrundsgeokemiska förstudier, vilka bl.a. syftar till att undersöka systematiska samband mellan olika granittypers geofysiska och geokemiska egenskaper.

Preliminära statistiska resultat från en pågående berggrundsgeokemisk - petrogeofysisk undersökning av serorogena granitoider i Bergslagen (en pilotstudie som bedrivs i samarbete med Kim Esbensen, Umeå Universitet och Dan Nisca, SGAB) visar att en stor del (ca 75%) av den systematiska geokemiska informationen kan predikteras med hjälp av ovannämnda petrogeofysiska parametrar och vice versa (se Esbensen och Wold, denna volym). För att ovannämnda typ av pilotstudie skall kunna leda till att man i framtiden delvis har möjlighet att indirekt "förutsäga" olika granitfasers geokemiska - metallogenetiska karaktär (och därmed deras mineraliseringspotential) med hjälp av billiga regionala geofysiska mark- och flygmätningar krävs dock omfattande geologiska - geofysiska - berggrundsgeokemiska kalibreringsstudier av ett flertal tektonomagmatiskt olikartade granitintrusiv i Sverige (se punkt 2 under Rekommendationer).

Undersökningsfas 2: Tillämpning av regional berggrundsgeokemisk prospekteringsteknik.

Teknisk - geologisk förutsättning

Den tekniska förutsättningen för att framgångsrikt kunna använda berggrundsgeokemi vid mineralprospektering är i första hand beroende på om man generellt kan urskilja en geokemiskt signifikant

karaktär hos bergarter vilka är genetiskt-rumsligt associerade till en viss mineraliseringstyp.

Resultat från en undersökning av Stemprok (1965) angående sambandet mellan Sn-W-Mo-mineraliseringar och rumsligt associerad bergartstyp (Fig. 2) antyder att nästan 80% av undersökta mineraliseringar är lokaliserade inom eller i närheten av en granitisk kropp.

Naturligtvis uppvisar inte alla granitgrupper eller granitvarianter samma typ av geokemisk respons i förhållande till en viss mineraliseringstyp på grund av bl.a. skillnader i deras genes, magmatektonisk utveckling, mineralogi eller varierande utbredning och intensitet av postmagmatiska och sekundära processer i granitoiderna. Vid all tolkning av geokemiska resultat bör man således om möjligt ta hänsyn till effekter av samtliga kemiska processer som kan ha påverkat granittyperna under deras magmatiska såväl som postmagmatiska utvecklingsperiod. Följdaktligen kan i princip distinkta mineraliseringsprocesser med säkerhet identifieras endast i de fall där dessa klart dominerar över andra kemiska företeelser (t.ex. magmatisk differentiation), vilka alla magmatiska djupbergarter mer eller mindre har varit utsatta för.

Provtagning - optimering av provtagningssystem

Huvudsyftet med en regional berggrundsgeokemisk undersökning är vanligen att medelst ett relativt litet antal prover, som är geografiskt glest fördelade över en viss geologisk enhet inom undersökningsområdet (målområdet), upptäcka geokemiska primära anomalier eventuellt associerade med en mineralförekomst. Detta innebär naturligtvis att den geografiska utbredningen av malmområdet oftast är mycket större än den eventuella mineralförekomstens utbredning. För att förhoppningsvis kunna påträffa signifikanta primära aureoler med så litet antal insamlade prover som möjligt, och därmed till en minimal kostnad, bör man eftersträva en optimal fördelning och täthet av proverna vid uppläggning av ett regionalt provtagningssystem. Samtidigt är det dock av fundamental betydelse att relevanta geokemiska slutsatser om en viss geologisk enhet kan dras från insamlade prover (dvs provtagningspopulationen) beträffande hela undersökningsområdet (dvs målområdespopulationen).

Ofta är det emellertid ej praktiskt möjligt att genomföra en fullständig berggrundsprovtagning i ett visst system. Detta kan bero på att målområdespopulationen inte är tillgänglig vid alla lokaler enligt systemet på grund av låg blottningsgrad av berggrunden, förekomst av sjöar och vattendrag samt otillgänglighet. Sannolikheten att sedan lyckas indikera en statistisk - geokemisk signifikant anomali ur ett optimalt insamlat provmaterial är i sin tur hvuudsakligen beroende på om den anomala populationen entydigt kan urskiljas från bakgrundspopulationen (angående statistisk dataanalys för urskiljning av en multivariat normal provtagningsmodell (MNPM) samt s.k. "outliers": se Esbensen och Wold, denna volym).

För att praktiskt utforma ett optimalt provtagningssystem kan ett s.k. stratifierat provtagningsförfarande användas, vilket innebär att varje litologisk undersökningsenhet i en region (t.ex. granitdomer fördelade över ett antal topografiska kartblad) indelas i likstora kvadratiska celler (t.ex. ekonomiska kartblad). Varje sådan cell indelas sedan ytterligare i fyra likstora subceller, inom vilka en eller flera häll(ar) provtas från varje slumpvist utvald granitdom inom hela undersökningsområdet. Från varje häll uttas sedan minst två prover. Några av dessa prover splittras i ett antal replikatprover för kontroll av bl.a. analys- och provberedningsfel (Fig. 3).

Teststuder med olika provvolymer från undersökta granitfaser (grovkorniga till finkorniga) bör även genomföras för att kunna fastställa den minsta provvolym som krävs för att alla mineralfaser är representerade i provet.

Genom variansanalys för s.k. obalanserat provtagningssystem (Andersson och Bancroft, 1952) beräknas därefter de olika undersökningsnivåernas varianskomponenter för olika geokemiska variabler (dvs variansen associerad till analys- och provtagningsfel, V_1; variansen mellan prover i en häll inom en subcell, V_2; variansen beroende på geokemiska skillnader mellan subceller, V_3; variansen beroende på skillnader mellan celler, V_4 och slutligen variansen beroende på skillnader mellan undersökningsområden, V_5) (Fig. 3). Förhållandet mellan den totala geokemiska variansen V_T (för en

variabel) och varianskomponenterna beräknas genom:

$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$

Ett stabilt eller optimalt provtagningssystem erhålls först i princip när V_1 är signifikant mindre än V_2, $V_2 < V_3$ osv. (dvs när systematiska geokemiska förändringar i en granitoidenhets sammansättning klart kan urskiljas på olika undersökningsnivåer). Om t.ex. V_2 är så stor att det är omöjligt att upptäcka geokemiska skillnader mellan subceller (dvs $V_2 > V_3$) behövs alltså fler hällprover inom en subcell och därmed reduceras alltså V_2 till V_2/n (n är antal hällprover).

I samband med pågående tillämpningar av det statistiska programpaketet SIMCA-MACUP (STU-projektet "Analogi-analys av regionala geokemiska data") på berggrundsgeokemiska data från bl.a. en Mo-mineraliserad granitdom i Arjeplogsområdet (Fig. 4) undersöktes resultat från olika typer av provtagningsstrategier med hjälp av SIMCA (Drake och Esbensen, in prep.).

Proverna, vilka insamlades av Drake 1978 och 1979 i LKAB Prospektering AB:s regi, är tagna dels från glest fördelade hällar över domens blottade delar (s.k. lokalprover) och dels från en ca 1.5 km lång Ö-W-lig profil (s.k. profilprover) (Fig. 5).

Då fördelning av befintliga prover tyvärr ej tillåter studie av ett stratifierat obalanserat provtagningssystem (enligt Fig. 3) undersöktes i stället den multivariata geokemiska strukturen i olika provtagningsmodeller (I-IX), vilka är baserade på både systematiskt och slumpvist urval av lokal- och/eller profilprover (Tab. 1), med hjälp av principalkomponent (PC)-analys i SIMCA. Därefter jämfördes modell I-IX med en typisk Multivariat Normal ProvtagningsModell (MNPN) för granitdom 5, i vilken alla tillgängliga prover exklusive ett antal "outliers" ingår (Fig. 6). Av Fig. 6 framgår att datastrukturen i modell IV och V bäst överensstämmer med MNPN, medan modell VII kraftigt avviker från normalmodellen. Detta innebär i praktiken att en provtagningsmodell där ca 23 st slumpvist utvalda lokal- och profilprover ingår ger ungefär samma information om domens huvud- och spårelementgeoke-

miska (tvådimensionella) struktur som en modell med 37 st prover (dvs provtagnings- och analyskostnader kan alltså reduceras med nästan 40% utan att väsentlig geokemisk information förloras).

I fig. 7 jämförs de geokemiska variablernas variabilitet när modell I-IX och MNPM ingår i PC-analysen. Figur 7 visar att de tio provtagningsmodellerna ger varierande grad av variabilitet för de geokemiska variablerna (dvs framförallt P_2O_5, Al_2O_3 och SiO_2 uppvisar en stor variabilitet medan TiO_2, Fe_{TOT} och MgO har en liten variabilitet och därmed bör vara homogent fördelade inom granitdomens blottade yta.

Kemisk analys - kontroll av analyskvalité

Provmaterial, provstorlek, provberedning, storleken på en del av provet som skall analyseras samt analysmetod är alla kritiska faktorer i samband med geokemisk prospektering.

Tyvärr är de analytiska standardmetoderna som för närvarande används vid de flesta prospekterande organisationer i Sverige, vad jag kan erfara, ej kapabla att ge tillfredsställande precision och framförallt tillräcklig analytisk känslighet för att på ett geokemiskt signifikant sätt bestämma Sn, W, Mo, Nb och Ta i bergartsprover och mineralfaser. Dessa elements mycket låga medelhalt samt ojämna fördelning mellan vanligen endast några få accessoriska mineralkomponenter i bergarter är naturligtvis bidragande orsaker till detta förhållande. Dessutom är tillförlitlig analysnoggrannhet mycket svår eller ibland nästan omöjlig att fastställa vid analys av dessa element med en viss metod. I första hand beror detta på att mycket få eller ibland inga alls rekommenderade haltvärden av ovannämnda element i internationella standardbergarter är tillgängliga eller publicerade i litteraturen för att kunna verifiera sina egna analysresultat från dessa referensprover. Existerande analysdata över elementen i de flesta internationella standardbergarter (Flanagan, 1976) varierar också stort allt efter vilket laboratorium som utfört analysen (Tab. 2).

Vid inledande översikt av tillgängliga analysmetoder i anslutning till STU-projektet" Petrogenetisk malmprospektering" (Armands och Drake, 1978) framkom det att spark-source-masspektrometrisk spårelementanalys av Sn, W, Mo, Nb och Ta var en av de få tillfredsställande och billigaste då tillgängliga (1974 - 1975) analysmetoder. På sista tiden har emellertid intresset för att kunna bestämma halter av Sn, W, Mo, Nb och Ta med god precision, stor noggrannhet och låg detekterbarhetsgräns i geologiskt material märkbart ökat hos de flesta prospekteringsorganisationer i Sverige (främst på grund av upptäckten av flera lovande Sn-W-Ta-uppslag i granitisk - pegmatitisk miljö). Detta faktum ger naturligtvis anledning till att undersöka analyskvalitén på alla idag tillgängliga och lämpliga analysmetoder i avseende på ovannämnda metaller. En sådan undersökning bör alltså omfatta kontroll av analytisk precision och noggrannhet, haltkalibrering samt statistiska beräkningar för att erhålla rekommenderade haltmedelvärden av dessa element i internationella granitiska referensprover på basis på redan publicerade data. I detta sammanhang kan det vara nödvändigt att även förfoga över svenska granitiska referensprover.

Databassystem för lagring och hantering av regional geodata från granitoider.

Under arbetet med STU-projektet "Petrogenetisk malmprospektering" upprättades en omfattande geokemisk datafil där även 20.000 enskilda huvud- och spårelementanalys från ca 1500 svenska granitiska bergartsprover ingår. En annan datafil innehåller uppgifter om varje provnummers geografiska läge enligt topografiska kartan över Sverige (ibland även med X- och Y-koordinaterna angivna) samt kodad information om alla provnumrens intrusions-, granitgrupp - och granittyptillhörighet. Befintliga datafiler bör naturligtvis integreras med annan geologisk - geofysisk information, vilken i framtiden kan utgöra ett flexibelt svenskt geodatabassystem för granitoider.

En utveckling av ett modernt geodataarkiv innebär att olika typer av geodata sammanställs i ett informationssystem, i vilket man på ett rationellt sätt kan lagra, söka, gruppera, bearbeta och presentera önskad informationsmängd om svenska granitoider med hjälp av en dator. Tillgången till ett väl fungerande geodataarkiv är naturligtvis också en förutsättning för att en modern multivariat statistisk dataanalys kan genomföras på ett tillfredsställande sätt.

Undersökningsfas 3: Multivariat dataanalys

De sista tio årens enorma framsteg inom elektronikens område har bl.a. inneburit en snabb utveckling av helt nya och/eller förbättrade halv- och helautomatiska analysinstrument, av vilka några kan registrera upp till 10.000 mätdata per sekund (se Burman, Carlsson, denna volym). Denna data-explosion ger naturligtvis en geokemist unika möjligheter att insamla stora mängder kemiska data och därmed förhoppningsvis erhålla väsentlig information om olika geokemiska systems beteende. Samtidigt behövs emellertid multivariata och helst kvantitativa matematiska-statistiska dataanalysmetoder till kemistens hjälp för att underlätta tolkning av geokemiska resultat vid t.ex. geokemisk kartering och mineralprospektering. Sådana hjälpmedel, vilka i princip utnyttjar information om alla undersökta variabler på en gång eller deras samvariation (dvs variablernas kovarians eller korrelation), kan benämnas analogi-analys-metoder. I statistisk litteratur kallas dessa metoder ofta faktoranalys, principalkomponent eller "pattern" recognition" analys vilka alla emellertid bygger på analogi-begreppet. Med hjälp av analogi-analys kan således stora mängder geokemiska eller andra kontinuerliga data reduceras, struktureras, visualiseras eller bearbetas på ett sådant sätt att tolkning av erhållna resultat kan genomföras framgångsrikt utan att geokemisten drunknar i alla rådata.

I kvantitativ analogi-analys sätts först geokemiska data från t.ex. berggrundsprover, tagna från olika granittyper eller geografiska områden in i matematiska modeller (s.k. principalkomponent-modeller), vilka sedan får ange den multivariata datastrukturen hos varje undersökningsenhet (s.k. klass). Denna datastruktur formuleras i princip som matematiska relationer mellan observerade värden på geokemiska eller andra variabler i alla prover (s.k. objekt), vilka ingår i en viss klass.

Genom att använda SIMCA och MACUP ("Soft Independent Modelling of Class Analogy", respektive "Modelling And Classification Using the PLS ("Partial Least Squares") methods"), utvecklade av Kemometrigruppen vid Umeå Universitet, är det möjligt att genom SIMCA erhålla typiska mönster hos t.ex. multivariata geokemiska data

registrerade på geologiskt provtagningsmaterial från varje undersökningsenhet (klass). Detta genomförs alltså genom att modellera datamatrisen för varje klass med hjälp av en empirisk principal-komponent-modell. Då flera klasser studeras kan var och en eventuellt urskiljas geokemiskt genom att genomföra olika statistiska parametrar, vilka ingår i principal-komponent-modellen. Nya objekt (dvs prover) från samma undersökningsenhet eller från en helt annan klass kan sedan kvantitativt klassificeras på grundval av deras likhet med en eller flera datastrukturer i tidigare SIMCA-analyserade klasser. Med MACUP kan man dessutom formulera en kvantitativ modell mellan en eller flera beroende variabler (y) och flera oberoende variabler (x) i varje klass (jfr multipel regressionsanalys). En MACUP-analys ger således en möjlighet att förutsäga y-värden med hjälp av x-värden och vice versa på nya objekt.

För detaljerad redovisning av samt referenser till SIMCA och MACUP hänvisas till Esbensen och Wold (denna volym) och Esbensen et al. (1983). Ovannämnda analogi-analys-metoder skulle sammanfattningsvis kunna utgöra ett mycket kraftfullt statistiskt redskap för att undersöka och jämföra komplexa mönster i geokemiska eller andra data från olika geologiska klasser. Vidare erbjuder SIMCA-MACUP-programmen lättolkade grafiska illustrationer av resultat från en multivariat analys. Man kan bl.a. direkt upptäcka karakteristiska objekt- och variabelmönster inom en klass eller mellan de klasser som undersöks genom att välja olika statistiska x- och y-parametrar vid plottning.

En preliminär undersökning av berggrundsgeokemiska data från olika granitdomer i NV Västerbotten (Fig. 8), vilken utförts tillsammans med Per Ihre, SGAB (Ihre, 1983), får illustrera SIMCA-metodens möjligheter att på ett lättolkat grafiskt sätt dels upptäcka bl.a. typiska geokemiska grupperingsmönster inom hela undersökningsmaterialet (Fig. 9) och dels beskriva de olika gruppernas karakteristiska geokemi (Fig. 10).
Genom att plotta första mot andra principalkomponenten (PC_1 mot PC_2) i ett s.k. teta-diagram (Fig. 9) kan man genom kompletterande fältgeologisk information i stort sett geokemiskt urskilja dels en grupp av "normala" Revsundsgraniter och dels flera mindre granitgrupper av satellitdomtyp (t.ex. leucograniter inom Joran- och Storträsk-

domen). De senare domerna är intressanta målområden för SGAB:s pågående Sn-W-prospektering i NV Västerbotten. Vidare uppvisar Revsundsgranitgruppen en typisk sur (SiO_2) till femisk (MgO, FeO, MnO m.fl.) karaktär (dvs en normal magmatisk differentiationstrend inom en djupbergartsvit) medan den geokemiska strukturen i Joran- och Storträskdomen däremot utmärks av den granitofila elementassociationen F-Rb-Li-Sn, vilken alltså indikerar de senare domernas höga Sn-mineraliseringspotential (Fig. 10).

Undersökningsfas 4: Diskriminering mellan granitoider med hög mineraliseringspotential och mineraliserade granittyper.

För att kunna styra kostnadskrävande detaljprospekteringsinsatser till endast mineraliserade granittyper behövs kompletterande tungmineralkemisk information från alla granittyper med hög mineraliseringspotential, enligt bedömningar från undersökningsfas 3. Därigenom kan man alltså urskilja granittyper, vilka innehåller ekonomiskt intressanta tungmineral såsom molybdenglans, kassiterit, volframit och kolumbit.

Preliminära resultat från en principialkomponentanalys (SIMCA) av egna "whole rock"- och tungmineralfasdata från 26 st granitprover, vilka representerar ett flertal geotektoniskt - mineralogiskt olikartade granittyper i Sverige, redovisas i Fig. 11 (Drake, in prep.). Av denna figur framgår att elementen W, Sn, Rb och Li i "whole rock"-prover är positivt korrelerade med Sn, Ta, Nb och Mo i motsvarande högmagnetiska tungmineralfaser (TMF-M: $d \geq 3.31$ g/cm^3), huvudsakligen bestående av magnetit. I de icke-magnetiska tungmineralfaserna (TMF-D: $d \geq 3.31$ g/cm^3) föreligger däremot endast en positiv korrelation mellan Mo i "whole rock"-prover och Mo-Sn-W-Nb-Ta i motsvarande tungmineralfaser. Tyvärr är hela undersökningsmaterialet alltför mineralogiskt heterogent för att man skall kunna dra några säkra mineralkemiska slutsatser om ovannämnda korrelationssamband.

Ur prospekteringssynvinkel bör dock den relativt lätt separerbara högmagnetiska tungmineralfasen (till största delen bestående av endast magnetit) i första hand vara en lämplig indikatormineralfas vid en metallogenetisk - geokemisk bedömning av olika granittypers Sn-W-Li-Nb-Ta-mineraliseringspotential i de fall då granit-

typer uppvisar mycket varierande mineralogisk sammansättning. Av Fig. 11 framgår också att halten av Sn i ett "whole rock"-prov i alla undersökta granittyper inte är positivt korrelerade med Sn-halten i motsvarande TMF-D (dvs Sn är troligen fördelat både i granitens lätta och tunga mineralfaser).

Genom att dela upp undersökningsmaterialet i ett antal tungmineralogiskt bättre definierade granitprovgrupper (t.ex. titanit-, ilmenit- och amfiboldominerande grupper), vilka har urskiljts med hjälp av röntgendiffraktometrisk data, hoppas jag dock framledes få en klarare bild av de granitofila metallernas fördelning och associationer i olika tungmineral.

Sammanfattningsvis presenteras ett flödesschema över föreslagen prospekteringsstrategi där arbetsinsatser inom samt syften med de fyra undersökningsfaserna i korthet anges (Fig. 12).

Rekommendationer

Med utgångspunkt från de synpunkter och resultat som har redovisats ovan vill jag framförallt rekommendera metodutvecklings- och forskningsinsatser inom följande fyra problemområden i anslutning till regional berggrundsgeokemisk undersökning av granitoider:

1. Pilotstude för optimering av provtagningssystem, enligt ett s.k. stratifierat obalanserat förfarande, dels inom extremt differentierade Sn-W-Mo-mineraliserade granitdomer och dels inom geotektoniskt likartade icke malmproduktiva domer, vars geologi är väl dokumenterad.

2. Kalibreringsstudier av integrerade regionala geologiska - geofysiska - berggrundsgeokemiska data från tektonomagmatiskt olikartade granitintrusiv i Sverige för att i framtiden kunna använda billiga geofysiska flygmätningar vid "indirekt" bedömning av granitoidregioners mineraliseringspotential.

3. Detaljerade geologiska - berggrundsgeokemiska - mineralkemiska undersökningar av extremt differentierade Sn-W-Mo-mineraliserade granitdomer för att klarlägga primära geokemiska dispersions-

mönster runt intrusiv i samband med postmagmatiska - hydrotermala processer.

4. Tillämpningar av de multivariata statistiska metoderna SIMCA-MACUP m.fl. för utvärdering och tolkning av geodata insamlade under punkt 1-3.

I första hand ger metodutveckling och forskning inom ovan föreslagna problemområden en bättre insikt i hur problem som berör kritiska moment inom berggrundsgeokemisk prospekteringsteknik praktiskt och teoretiskt kan angripas och lösas. Detta innebär givitvis att geokemisk berggrundsprospektering i såväl regional som detaljerad skala i framtiden kan genomföras på ett mer tillfredsställande sätt ur teknisk-vetenskaplig synvinkel.

Referenser

Anderson, R.L. och Bancroft, T.A., 1952: Statistical Theory in Research. McGraw-Hill. 399 pp.

Armands, G. och Drake, K.-M., 1978: Litogeokemisk malmprospektering med särskild hänsyn till tenn, volfram, molybden i svenska granitoider. Del I-V: A-B. Stockholms Universitet, Stockholm. (ISBN 91-7260-246-5).

Armands, G. och Drake, K.-M., in press: Metallogeny of Precambrian granitoids in Sweden. In, Metallogeny of the Precambrian. A.V. Sidorenko och A.A. Beus (eds.), Moskva. IGCP 74/1/91.

Burman, J.O., 1983: Metoder för analys av berggrundsgeokemiska prover. Denna symposievolym.

Carlsson, L.E., 1983: PIXE, en metod för kemisk analys. Denna symposievolym.

Chatterjee, A.K. och Muecke, G.K., 1982: Geochemistry and the distribution of uranium and thorium in the granitoid rocks of the south mountain batholith, Nova, Scotia: some genetic and exploration implications. In, Uranium in granite. Y.T. Maurice (ed.) GSC Paper 81-23.

Drake, K.-M., 1981: Geochemistry of tin, tungsten and molybdenum in Swedish Proterozoic granitoids: its potential use in regional mineral exploration. Meddelanden från Stockholms geologiska institution, Stockholm, nr 249 (dokt.avh.).

Drake, K.-M., in prep.: Tungmineralkemiska studier av svenska granitoider (STU-LKAB-slutrapport).

Drake, K.-M. och Esbensen, K.H., in prep.: Optimal sampling density for investigation of metalliferous granitoids.

Dukhovskiy, A.A., 1982: Geophysical charateristics of greisen deposits. Internat. Geology Rev., v. 24, no. 1.

Eriksson, L. och Henkel, H., 1980: A preliminary discussion of fundamental deep structures in the Precambrian bedrock interpreted from magnetic and gravity maps of Scandinavia. SGU, Geofysisk rapport, ID-nr 8011.

Esbensen, K.H., Johansson, E., Drake, K.-M. och Wold, S., 1983: Recognising polygenetic geochemical data patterns by multivariate soft bilinear modelling using selective partial least squares techniques (SELPS). In, Symposium on Applied Statistics, Jan. 26-27, 1983. Copenhagen. D. Edwards och A. Höskuldsson (eds.).

Esbensen, K.H. och Wold, S., 1983: GDAM - an intergrated strategy for multivariate geochemical data analytical modelling. Denna symposievolym.

Flanagan, F.J., 1976: Description and analyses of eight new USGS rock standards. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 840, pp. 131-187.

Govett, G.J.S., 1982: Rock geochemistry in mineral exploration. Handbook of Exploration Geochemistry, v. 3. Elsvier. 461 pp.

Ihre, P., 1983: Sammanställning och utvärdering av litogeokemiska undersökningar i Storumanområdet. SGAB Prosp. Div., FoU-rapport, PRAP 83-515.

Selinus, 1983: Multivariate statistical analysis in lithogeochemical prospecting, as applied to an area in Central Sweden. Journ. Geochem. Expl. In press.

Stemprok, M., 1965: On the relation of Sn-W-Mo ore deposition to granites. Krystalinikum, 3, pp. 163-183.

Wilson, M. och Åkerblom, G., 1981: Geological setting and geochemistry of uranium-rich granites in the Proterozoic of Sweden. Min. Mag. 46, pp. 235-247.

Yeates, A.N., Wyatt, B.W. och Tucker, D.H., 1982: Application of gamma-ray spectrometry to prospecting for tin and tungsten granites, particularly within the Lachlan fold belt, New South Wales. Econ. Geol., 77, pp. 1725-1738.

Tab. 1. Undersökta multivariata provtagningsmodeller för en Mo-mineraliserad granitdom vid Björntjärn.

Provtagnings-modell	Antal prover	Strategikriterium	Ingående provlokaler (Se Fig. 5)
I	5	Slumpvist urval (av tot. 37 st lokal- och profil-prover)	16, 19, 25, 34, 41
II	10		18, 19, 20, 22, 25, 27, 30, 37, 38, 42
III	15		11, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 23, 24, 26, 27, 34 35, 45, 46
IV	20		11, 12, 14, 15, 15, 16, 18, 19, 21, 23, 26, 27 32, 34, 36, 37, 39, 40, 41, 43, 45
V	25		11, 13, 14, 15, 16, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 43, 45, 46
VI	11 (var 2')	Systematiskt urval (av tot. 29 st profil prover)	10, 12, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30
VII	8 (var 3')		10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31
VIII	6 (var 6')		11, 15, 19, 23, 27, 31,
IX	14	Gles. geogr. fördelning	32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46
MNPM	37 (alla tillgängliga pr. exkl. "outliers")	Multivariat prov-tagningsnormal-modell (se Esbensen och Wold, denna volym)	10 - 6

Tab. 2. Jämförelse mellan lägsta och högsta haltvärde för Sn, W, Mo, Nb och Ta i fyra "USGS"-standardbergarter enligt resultat från olika laboratorier.

Element:	AGV - 1	BCR - 1	GSP - 1	G - 2
	(Lägsta och högsta medelvärde angivet i ppm)			
Sn	1 - 9	1 - 9	4 - 8.6	1.1 - 5
W	0.45 - 0.58	0.24 - 0.70	0.12 - 0.30	0.04 - 0.46
Mo	1 - 13.0	1 - 7.1	0.27 - 8.3	0.13 - 6.2
Nb	8 - 21.7	9 - 34.1	19 - 29.4	8 - 16.1
Ta	0.55 - 2.3	0.50 - 1.1	0.63 - 2.2	0.51 - 1.5

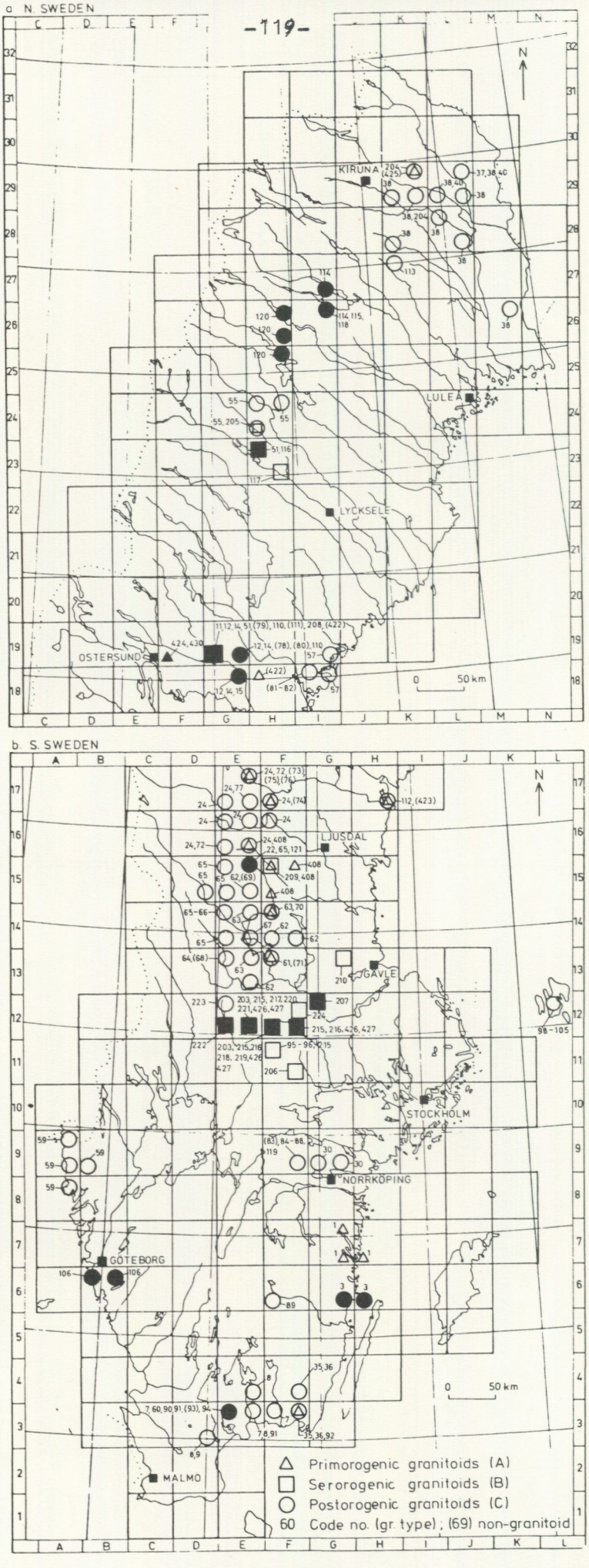
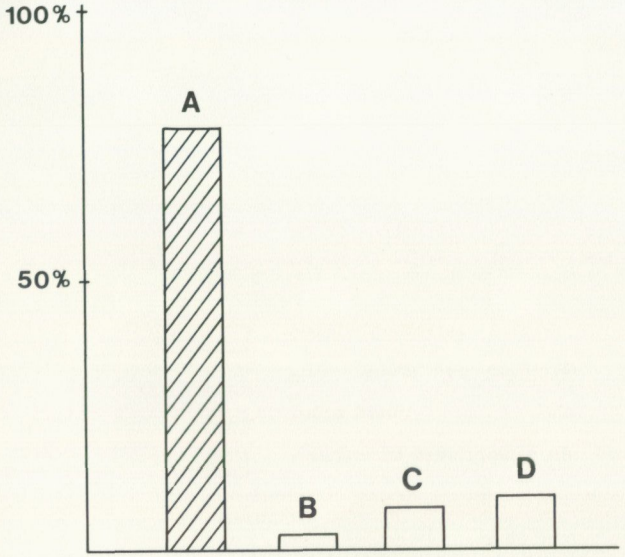
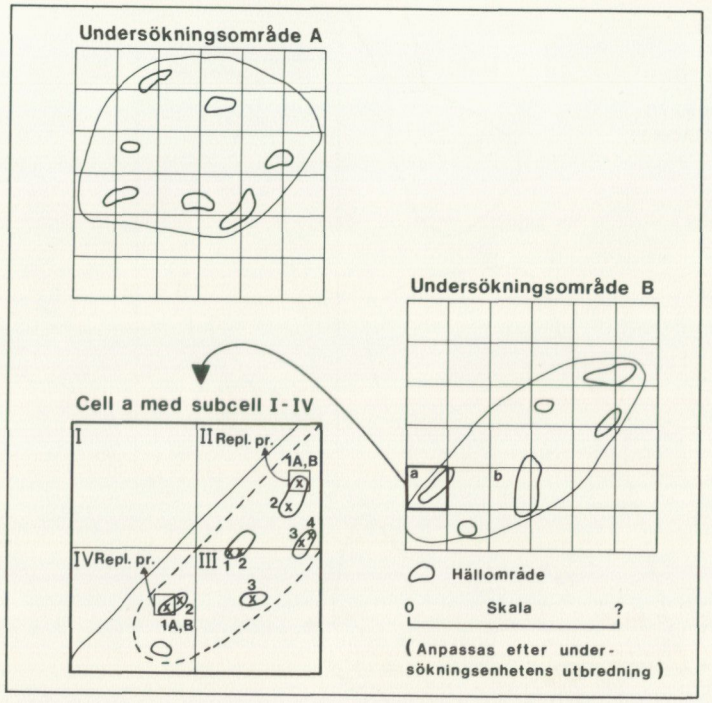


Fig. 1. Geografiskt läge för radioaktiva Sn-W-Mo-anomala prim- (fylld triangel), ser- (fylld kvadrat) och postorogena (fylld cirkel) granitoider i Sverige.



A	**78.5 %**	**med granit**
B	**3.0 %**	**med intermediär- basisk. mag. bg.**
C	**8.5 %**	**med effusiva bg. och sura gång bg.**
D	**10.0 %**	**saknar klar rumslig association**

Fig. 2. Samband mellan 363 st Sn-W-Mo-mineraliseringar från hela världen och typ av rumsligt associerad bergart (Stemprok, 1965).



Variationer, uttryckt i varianser (v_1-,v_5), på olika undersökningsnivåer (1-5):

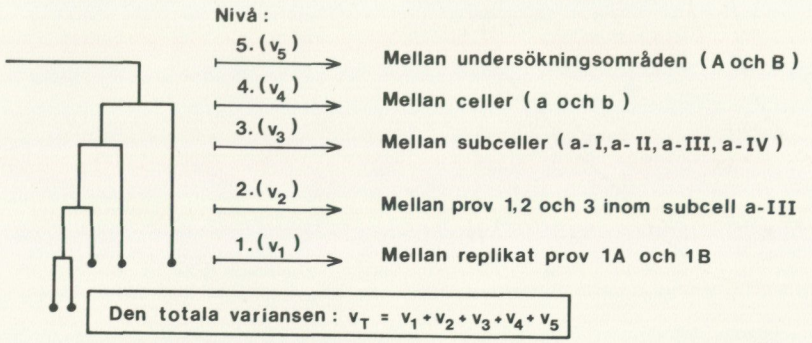
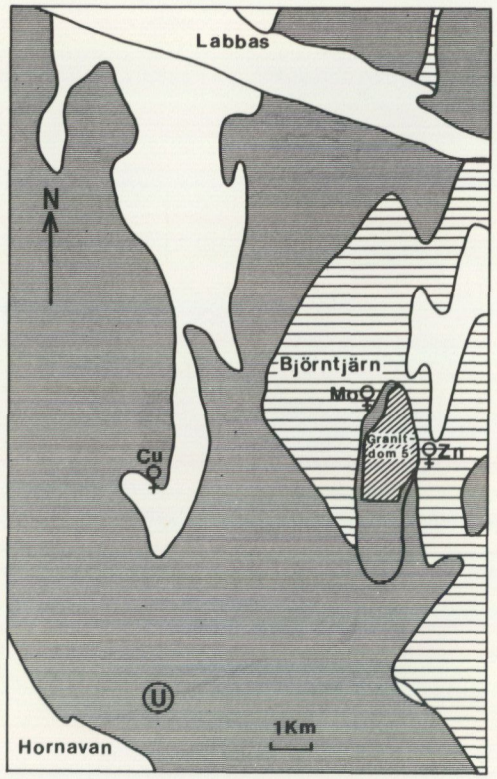


Fig. 3. Principbild för ett stratifierat obalanserat provtagningssystem i samband med regionala berggrundsgeokemiska undersökningar av plutoniter.



Område av granitdom 5 där provtagning ägt rum.

Yngre granit

Fink.- kongl. sed. bergarter

Övriga bergarter

Fig. 4. Geografiskt läge för en undersökt Mo-mineraliserad granitdom vid Björntjärn i Arjeplogsområdet samt berggrund och mineraliseringar inom del av Rappenfältet (av Einarsson (1974) efter SGU material).

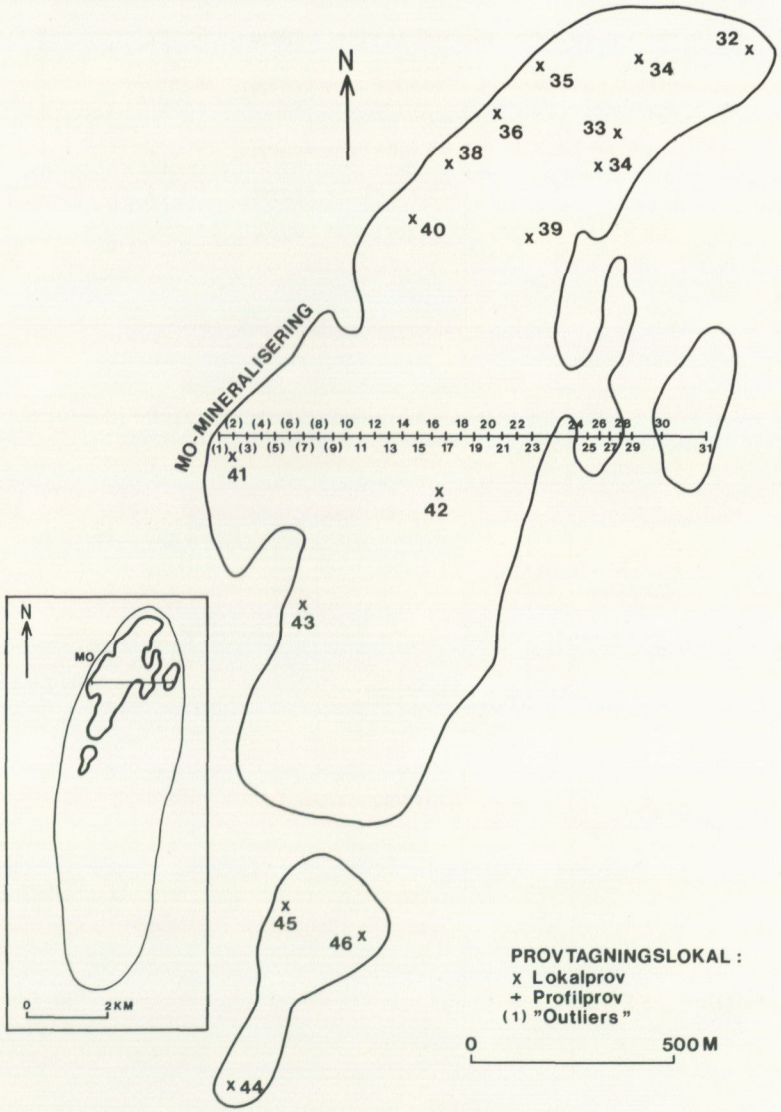


Fig. 5. Provtagningskarta över Mo-mineraliserad granitdom vid Björntjärn.

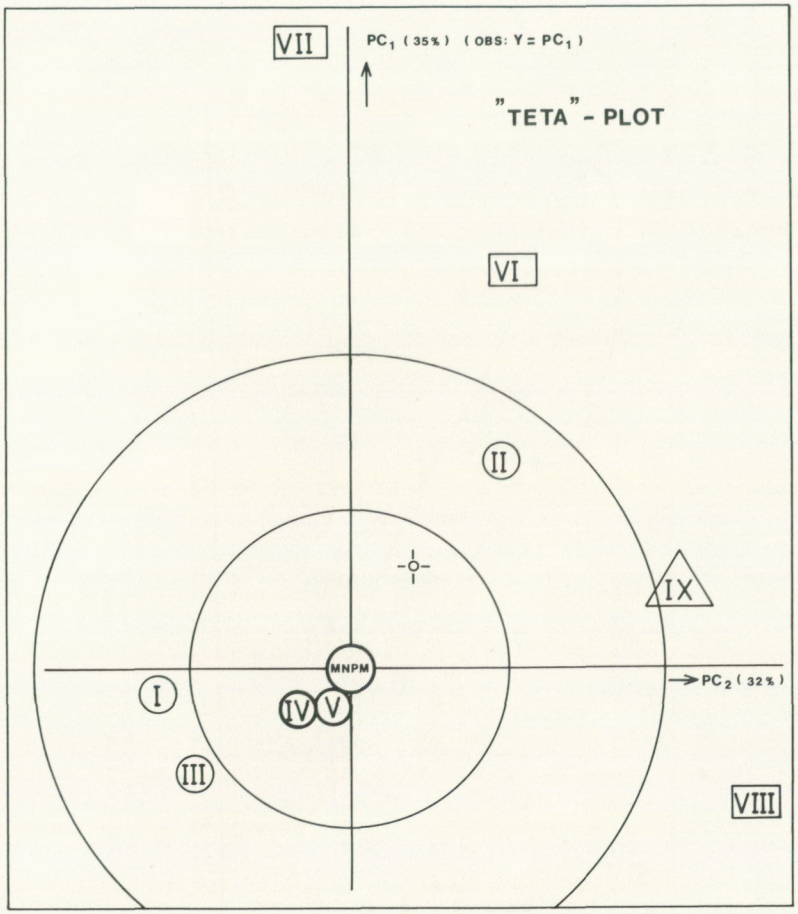


Fig. 6. Jämförelse mellan multivariat geokemisk struktur i provtagningsmodell I - IX och MNPM (multivariat normal provtagningsmodell) för granitdom vid Björntjärn (sk. "teta"-plot).

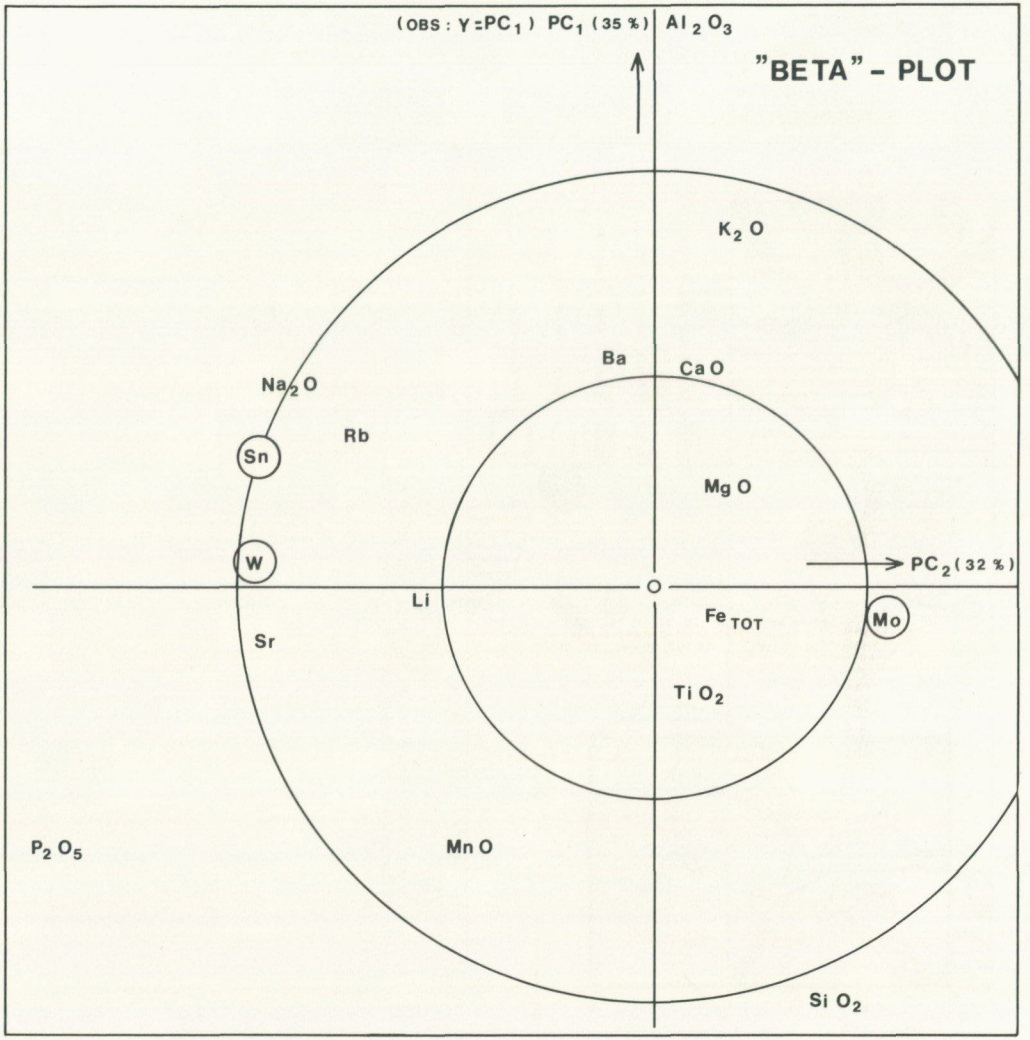


Fig. 7. Jämförelse mellan de geokemiska variablernas variabilitet i granitdom vid Björntjärn när provtagningsmodell I - IX och MNPM studeras samtidigt med hjälp av principalkomponentanalys (sk. "beta"-plot).

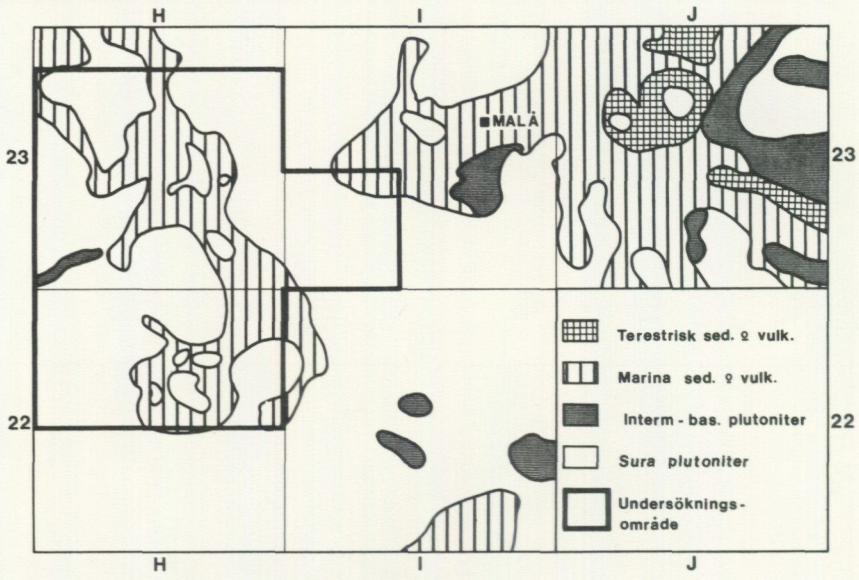


Fig. 8. Förenklad berggrundsgeologisk karta över delar av NV Västerbotten (av Quesada och Ihre (1982) efter SGU material).

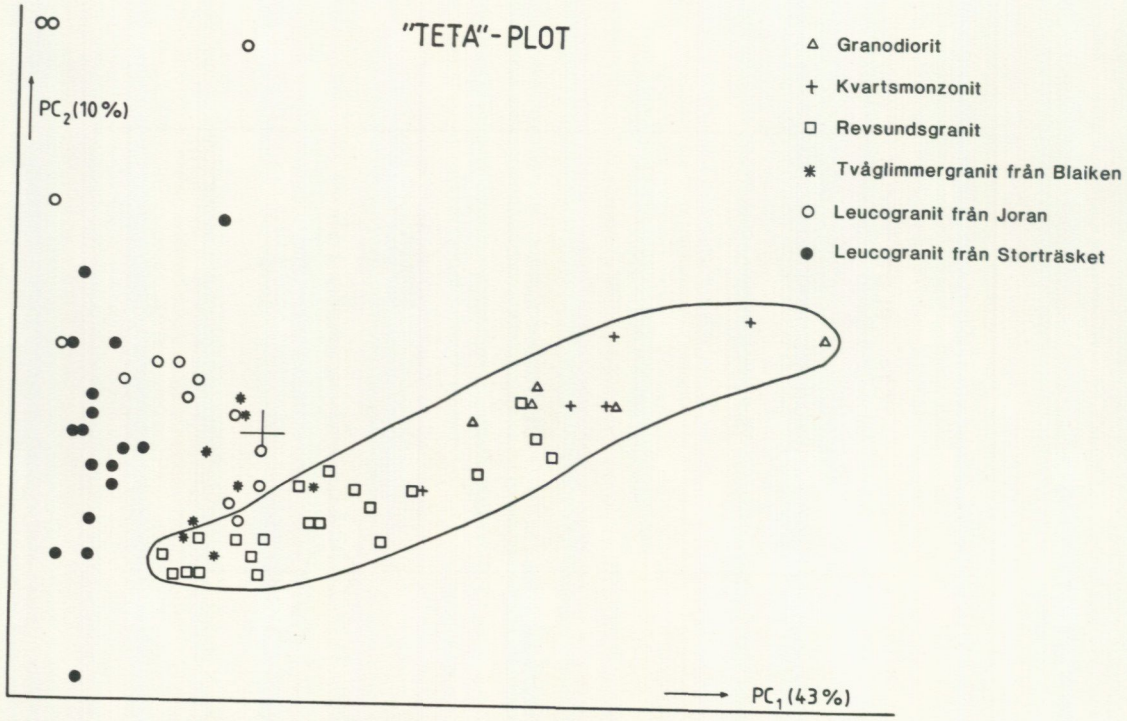


Fig. 9. Mutltivariat geokemisk klassificering av granitiska prover från NV Västerbotten. Område som begränsas av heldragen linje anger en grupp av "normala" sura till intermediära Revsundsplutoniter (sk. "teta"-plot).

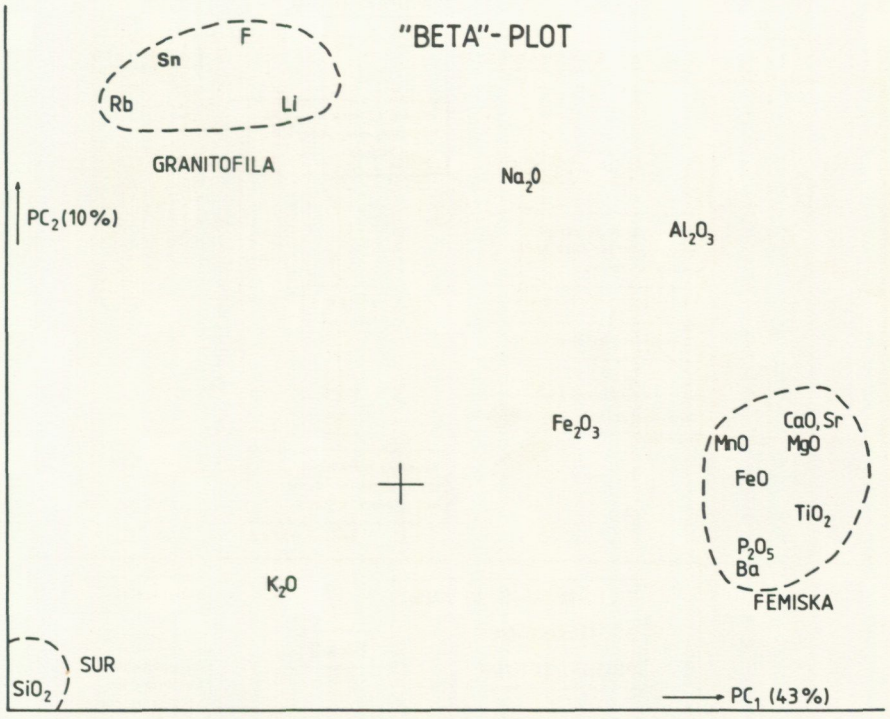
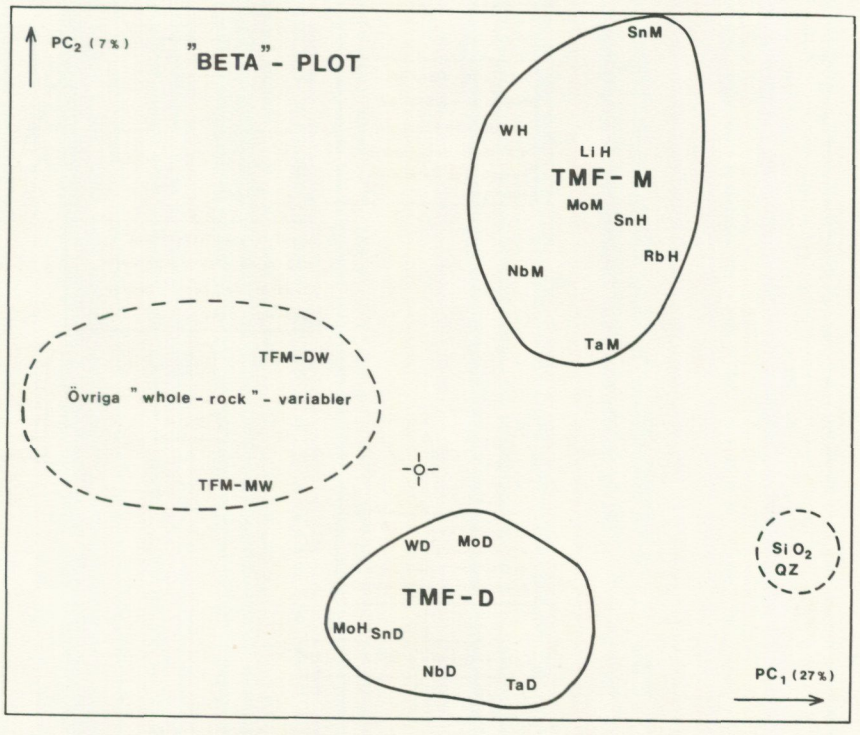


Fig. 10. Multivariat geokemisk karakterisering av sura till intermediära Revsundsplutoniter från NV Västerbotten (sk. "beta"-plot).



SnH : Sn-halt i "whole rock"-prov

SnD : Sn-halt i TMF-D (Tungmineralfas med d≥ 3.31 g/cm³)

SnM : Sn-halt i TMF-M (Tungmineralfas starkt mag.; d≥ 3.31 g/cm³)

TMF-DW, TMF-MW } Procentuell vikt av TMF-D resp. TMF-M (per 100 g provmängd)

Fig. 11. Principalkomponentanalys, visande korrelationssamband mellan geokemiska variabler i "whole rock"-prover och motsvarande tungmineralfaser från 26 st svenska granittyper.

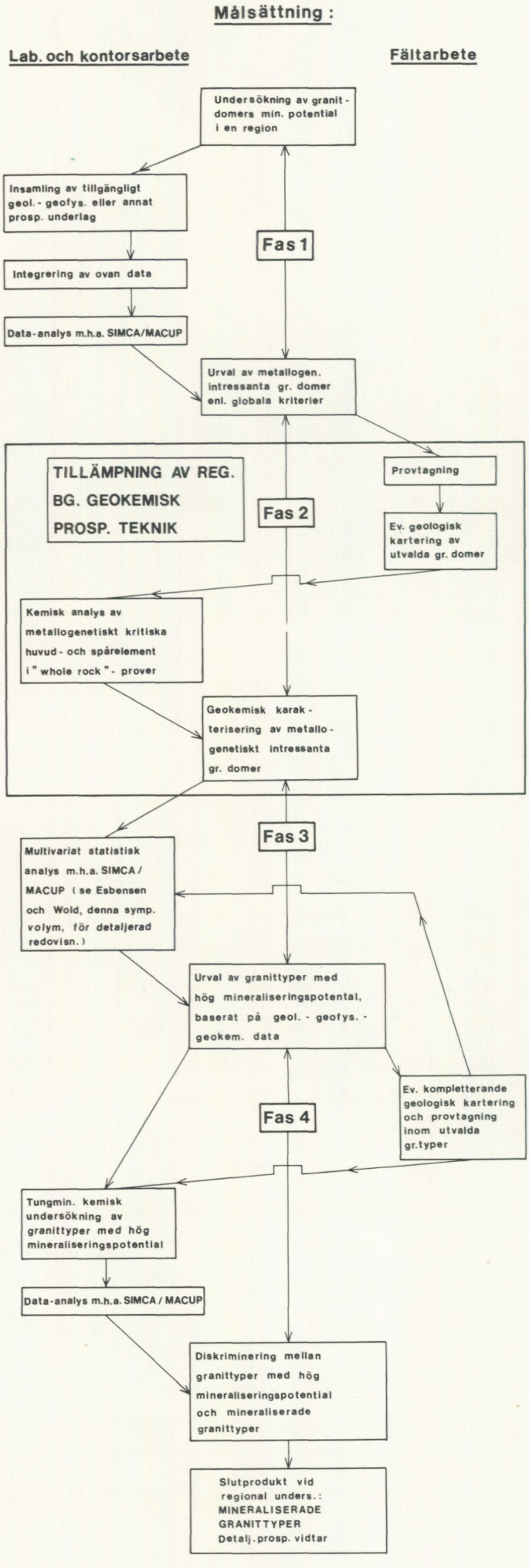


Fig. 12. Flödesschema över föreslagen prospekteringsstrategi vid regional metallogenetisk undersökning av granitoider.

SGU:S BERGGRUNDSGEOKEMISKA UNDERSÖKNINGAR MED EXEMPEL FRÅN VÄSTERBOTTEN OCH BERGSLAGEN

Olle Selinus
Sveriges Geologiska Undersökning
Box 670
751 28 UPPSALA

Berggrundsgeokemiska undersökningar i urberget har pågått på SGU sedan 60-talet. Undersökningar har också skett i större skala i fjällbergarterna, framförallt i Stekenjokksområdet.
En av de första undersökningarna inom den geokemiska avdelningen var den i Rudtjebäcken i Adakfältet i början av 60-talet, utförd av Britt Nairis. Hon analyserade och bearbetade 241 prov från 7 borrkärnor vid Rudtjebäcken och påvisade med hjälp av faktoranalys aureoler runt malmen. Aureolerna som framkom var med andra ord multielementaureoler som i detta fall hade varit svåra att upptäcka vid studium av enbart elementens råvärden.

I slutet av 60-talet påbörjades en motsvarande undersökning i Tomtebo gruva i Bergslagen. Denna bekostades av Stora Kopparbergs Bergslags AB, men analysering och databehandling skedde på SGU. Tomtebo ligger V om Stora Skedvi (fig. 1) och består av kopparmalmer i söder (Gårdsgruvan) och mot norr zink-blymalmer (ABC-malmerna) och järnmalmer (Björngruvan). 263 berggrundsprov analyserades och då det visade sig att den information som erhölls av råvärdena var liten, kördes faktoranalys. Då framträdde en zonering runt de kända malmerna. (De figurer som visas nu härrör alla från 200 m avv.) ABC-malmerna är zinkblände-blyglansmalmer med en del guld och silverglans. Här var Zn-Pb-Ag-aureolerna de mest utbredda (fig. 2). I denna figur ser vi en avtagande zonering bort från dessa malmer. Detta åskådliggörs av s.k. trendanalys som är en typ av regressionsanalys och som nämndes vid mitt tidigare föredrag i morse. Den faktor som visas i denna figur har sammansättningen Ag, Pb, Zn, S och Fe.

I södra delen av fältet närmare Gårdsgruvan sker en övergång till kopparrikare aureoler eftersom Gårdsgruvan är en utpräglad pyrit-kopparkismalm. I fig. 3 ser vi att Ag- Pb- Zn- aureolen fortfarande är kraftig mot norr,

men är obetydlig mot söder. Här blir istället aureoler bestående av S-Cu-Bi-As-Fe betydligt kraftigare (fig. 4). Längst i söder återfinns en vacker zonering som inte kan förklaras av de kända malmerna i fältet (bh 4/69). Strax norr därom finns motsvarande aureoler, men svagare. Dessa är med all sannolikhet djupaureoler. Kartan visar förhållandet på 200 m avv., men Gårdsgruvan spetsar ut på 150 m avv., vilket betyder att aureolerna sträcker sig åtminstone 50 m under malmens utspetsning.

Resultaten och metodiken från denna undersökning kunde senare användas på Malånäset i Västerbotten. Under 70-talet utfördes en stor berggrundsgeokemisk undersökning i detta område i regional skala (c:a 200 km^2) med prov från enbart hällar. Malånäset ligger i centrala Skelleftefältet (fig. 5) och består till övervägande del av sura och intermediära vulkaniter (kvartsporfyrer, keratofyrer, kvartskeratofyrer, agglomerat och tuffer), med basiska inslag, och framförallt i västra delen av fylliter och svartskiffrar. I fältet finns ett antal sulfidmalmer, t.ex. Maurlidenmalmerna, östra Högkulla, Bjurfors, Bjurliden och Norra Norrliden.

C:a 1500 hällprov analyserades och efter plottning av alla analysdata visade det sig att inga klara aureoler runt malmerna fanns, som man rent praktiskt kunde använda i prospekteringssyfte. Därför kördes faktoranalys på materialet (efter att ha delat upp proverna i olika bergarter). Resultatet av faktoranalysen ses i fig. 6, där en 9-faktor modell valdes. Här ser vi att t.ex. Fe är uppdelat i 5 olika faktorer, vilket ger vid handen att råvärdena av Fe endast ger den totala halten av detta element, utan hänsyn till järnets association till olika geologiska processer. Det ter sig därför naturligt att dela upp Fe på detta sätt i olika faktorer. Detsamma gäller även de övriga elementen.

Faktor 4 är en intressant faktor och visar fördelningen av Mg, Fe och Mn tillsammans med malmelementen Zn, Bi och Ag. Det är en god samstämmighet mellan denna faktor och områden med kända malmer (fig. 7). Även om både faktor 1 och 4 visar på fördelningen av Fe, Mg och Mn är deras utbredning olika. En spekulativ förklaring till detta är följande:
Den fasta lösningen av ett element i ett kristallgitter är högre vid högre temperatur. Malmelementen går in i gittren som blir mättade, men när temperaturen sjunker kristalliseras dom som små inneslutningar i silikaterna. Faktor 4 kan eventuellt på detta sätt separera de variationer som beror på

malmmineralinneslutningar från malmelement i silikaterna.

Fig. 8 visar faktor 4 vid Önusberget i NW delen av fältet. Här finns en kraftig zonering av denna faktor, dessutom i kombination med en starkt Zn-anomali i organiska bäckprover. Dessa anomalier är fortfarande ej förklarade.

Fig. 9 visar olika elementzoneringar runt några kända malmer: Ö Högkulla och Bjurliden (faktor 7 d.v.s. Zn, Pb) samt Skäggträskberget och Östra Högkulla (faktor 4). Som synes är zoneringarna vidsträckta, åtminstone 500 meter.

Fig. 10 visar faktor 8 (As) vid Maurliden i NW delen av fältet. De två malmtecknen visar läget för mellersta och östra Maurliden. I norra delen av kartan finns exakt liknande elementfördelning, men dessa anomalier (I och II) är ej förklarade.

Fig. 11 visar en sammanfattning av faktor 1 (Fe contra Ti, Ca, Mn, V, Mg), faktor 4 (Mg, Fe, Mn, V, Zn, Bi, Ag) och faktor 5 (Sr, Ca, Mn, V) vid Maurlidenmalmerna. Vid sammanställningen ser man att en klar zonering av huvudelementen föreligger, en zonering som inte går att upptäcka i råvärdena. En yttre zon har högre halter av Mg, Mn, Ca, Sr och Ti och lägre halter av Fe. En central zon har högre halter av Sr, Ca och Mn, och lägre halter av Mg och Fe. En innersta zon har en anrikning av Mg, Ca, Mn och Fe.

Förklaringen på detta kan vara följande: De anrikade elementen kan vara tillförda samtidigt som Fe har urlakats. En anrikning av Mg och Ca kan bero på en genomströmning av havsvatten och blandning i den vulkaniska zonen, eller att de malmförande lösningarna (från en magmatisk källa eller cirkulerande havsvatten) från början var anomalt rika på dessa element. Urlakningen av Fe kanbero på urlakning under passagen av lösningarna genom den vulkaniska zonen.

De inre zonerna med en högre halt av Mg, Mn och Ca och en urlakning av Fe kan bero på senare överlagring av hydrotermal aktivitet som resulterat i en svag pyritimpregnation.

Denna undersökning har alltså visat på att man för att få ut det mesta

möjliga av det analyserade materialet måste arbeta med vidare statistisk bearbetning, med multivariata metoder. Multielementzoneringar kan alltså ge betydligt vidsträcktare och mer distinkta aureoler.

I slutet av 70-talet påbörjades en stor berggrundsgeokemisk undersökning i Stollbergsfältet nära Ludvika. Denna var ett STU-projekt med SGU och Svenska Gruvföreningen, och finansierades av STU, SGU, Statsgruvor AB, LKAB prosp. AB och Utvecklingsfonden i Kopparbergs län.

Stollbergsfältet består av ett stort antal manganrika järnmalmer och sulfidmalmer (fig. 12) och ligger i östra skänkeln av en synklinal vars centrala övre del huvudsakligen utgörs av glimmerskiffrar. Berggrunden domineras helt av olika typer av lentit som utsatts för kraftig metamorfos. Leptiterna är mest kali-dominerade.

Mineraliseringarna i fältet kan i strykningsriktningen följas nästan 10 km. De största malmerna (fig. 13) är Brusmalmen vilken är en rik blyglans-zinkbländemalm med höga silverhalter samt Stollmalmen som är en zinkblände-blyglansmalm som nästan kan karakteriseras som en mangan- kalk järnmalm.

Fältet karakteriseras av en betydande stel tektonisering, med tre stora block som förskjutits i förhållande till varandra. Södra blocket begränsas mot norr av en mycket kraftig NNE-förkastning och språnghöjden anses vara c:a 1 km. Det centrala blocket är nedpressat i förhållande till det norra och södra.

Provtagning har skett från borrkärnor, ortväggar och hällar. Sammanlagt har 2300 prov tagits och i samband med detta har 10 000 m borrkärnor karterats om och flera hundra slipprov tagits för att få en geologisk plattform att stå på. (Detsamma gäller givetvis också för de tidigare nämnda undersökningarna). Analysering har sedan skett på XRF och IDES.

På grund av det som nämnts tidigare om populationer, kan antas att råvärdena ej uppvisar några markanta zoneringar vid malmerna eller tydliga fördelningar för övrigt. Detta stämmer i stort. Resultaten visar att det i de flesta fall inte går att plotta råvärdena på kartor och sedan använda dessa kartor för att fastställa var eventuella aureoler och malmer finns. Emellertid uppvisar vissa element en viss zonering, men denna sträcker sig inte längre ut än de mineralogiska omvandlingarna, vilket gör att råelementzoneringen i stort sett är oanvändbar för prospekteringsändamål. Vissa kvoter kan visserligen användas, men de utsträcker inte

aureolerna nämnvärt, utan ger bara en mera distinkt bild i närheten av malmerna, där det ändå går att använda de mineralogiska omvandlingarna för att fastställa malmzonerna.

Vid betraktande av enbart råvärden kan följande sammanfattning ske: malmelement, Fe_2O_3, MgO, MnO och i någon mån K_2O har ett maximum nära malmerna och minskar snabbt utåt. Na_2O, F, Sr, Al_2O_3 har ett minimum nära malmerna, och ökar snabbt utåt. V-halterna är markerat låga i öster och lägst i norr

Med anledning av den diffusa elementbilden har först faktoranalys körts (efter SELLO-transformering). Denna har skett på kvartsiter och leptiter för att få ett homogent material. En 10-faktormodell ansågs bäst (fig. 14).

Tolkningen av faktormatrisen är följande:

Faktor 1: ZnS-PbS mineraliseringsfaktor. En del Sb finns med.

Faktor 2: I denna faktor förekommer sådana element att faktorn kan betecknas som en sur-basisk faktor.

Faktor 3: Troligen till större delen en kalifältspatfaktor eftersom Fe och Mg är motsatt K, Ba och Al. En del av variationen torde emellertid hänföra sig till muskovit-biotitfördelningen.

Faktor 4: Troligen en plagioklasfaktor. Sr substituerar Ca.

Faktor 5: Cu FeS_2 och FeAsS faktor.

Faktor 6: Ag-fördelningen uttrycks i denna faktor. Eftersom Ag är ensam i denna faktor och kvadratsumman är 80% och Ag ej finns i någon annan faktor uttrycker denna faktor samma sak som på råvärdena av Ag.

Faktor 7: Karbonatfaktor. I leptiterna och kvartsiterna förekommer en del smärre karbonat eller skarninslag som har varit svåra att utesluta. Dessa tar sig uttryck i denna faktor.

Faktor 8: W-faktor

Faktor 9: Bi-faktor. För övrigt se faktor 6.

Faktor 10: Denna faktor ger helt uppenbart uttryck för analysfel. Detta är ett typiskt exempel på att det går att få bort vissa variationer som beror på detta, genom faktoranalys.

För att få en klassificering av alla prov utgående från om de härstammar från malmerna eller ej används sedan diskriminantanalys. Detta gjordes på factor scores, d.v.s. på resultaten av faktoranalysen. Eftersom uppdelning i olika grupper eller populationer skett i faktoranalysen bör diskriminantanalysen utföras på detta material. På detta sätt bearbetas enbart de variationer som har med malmerna eller aureolerna att göra, och resultaten blir mycket mera renodlade.

Vid klassificering med hjälp av diskriminantanalys måste vissa prov, vilkas grupptillhörighet är kända, tas ut på förhand. Då i de flesta körningarna proverna skall grupperas i malm resp. bakgrundsprov, valdes ett antal sådana ut.
Malmproverna är uttagna i nära anslutning till de olika malmtyperna. 83 bakgrunds- och 92 malmprov togs ut. Därvid fanns tillräckligt många kända prov kvar för att testa klassificeringsmodellerna.

Vid plottning av diskriminantscores av dagproverna, bil. 15a framträder en mycket tydlig och vidsträckt zonering. Alla de kända malmerna kommer fram i detalj, även Lustigkulla som är en liten malmkropp. Zoneringen är koncentrisk mot såväl öster som väster. Själva Brusmalmen kommer ej fram i detalj norr om förkastningen, givetvis beroende på att malmen är avskuren i sina övre delar, däremot återfinns Brusmalmens aureol S om förkastningen, i malmens södra förlängning. Trots att malmen är en dold malm, vilken ej har utgående i dagen, återfinns den i form av aureoler i förlängning mot söder. En viss antydan till en parallellzon tilldet stora malmstråket finns 500 m väster om Dammberget. Denna zon är även konstaterad med geologi och geofysik.

En mycket markant zonering uppträder c:a 1.5 km SSV om Brusgruvan. Denna aureol är vidsträckt och stark, och kan indikera en okänd mineralisering vilken ej når upp idagen. Inga antydningar till mineralisering har här

indikerats geologiskt eller geofysiskt, men området ligger i direkt fortsättning mot söder av Brusmalmszonen, mellan karbonater i öster och metabasiter i väster, dvs i det stratigrafiska läge där de övriga malmerna i fältet befinner sig.

En klar zonering finns således i dagen. I södra delen av fältet där provtagningsområde är bredast kan konstateras att denna sträcker sig minst 1.5 km ut från malmerna. 1.5 km väster om Brusmalmen och 1 km V om Ko-Långgruvan börjar nya aureoler att uppträda, med en successiv minskning av diskriminantscores i västlig riktning.

Under jord har också samma distinkta zonering erhållits. Stollgruvemalmen uppvisar en synnerligen kraftig zonering (bil. 16). Denna återfinns på samtliga nivåer. En tydlig minskning i intensiteten sker mot djupet, vilket visar att malmen avtar nedåt, något som ej kan utläsas ur geologiska data. Detta visar att även en vertikal zonering förekommer, något som är viktigt i betraktande av att denna undersökning bl.a. har som mål att utveckla en metod för djupprospektering.

Hela malmzonen under jord kommer markerat fram vid denna undersökning. Den syns givetvis klart på geologiska kartan också, men det är viktigt att notera att de erhållna aureolerna ej är begränsade till malmkvartsiterna eller de mineralogiska omvandlingarna, utan successivt går ut i alla de omgivande kvartsiterna och leptiterna. Detta framträder genom att faktoranalysen i sig ger en normalisering av proverna i förhållande till bergarterna och att större hänsyn tas till de olika bergarternas sammansättning, än om de skulle klassificeras enbart från geologisk-mineralogiska utgångspunkter.

Ett intressant området återfinns på 575 m nivå, norra delen. Såväl faktorscores som discriminantscores ger anomalier här. På grundval av den zonering som på detta sätt har kunnat upptäckas här borrades ett hål (20/79). Detta gick vid 142 m genom en sprickmineralisering på 1/2 m bredd m 11.65% Pb, 0.35% Zn och 226 g/t Ag. Ett nytt borrhål sattes (21/79),men detta var tomt. Borrkärnorna analyserades och den geokemiska bearbetningen av analyserna visade att anomalin troligen förklaras av denna mycket rika, men begränsade sprickmineralisering.

Resultaten av nämnda analys kan också appliceras på t.ex. Brusmalmen. I

bil. 17 finns en vertikal profil i ostvästlig riktning strax söder om denna malm. Profilen sträcker sig från jordytan till c:a 650 m djup. Det översta borrhålet B1 ligger 350 m längre mot söder varför det ej kan direkt jämföras med de övriga hålen. Det är dock inlagt i figuren för att visa det relativa läget, och resultaten hos detta borrhål visas i bil. 18.

Mycket tydliga aureoler (diskriminantscores) förekommer längs hela malmen. De är mest vidsträckta på högre nivåer, men vid c:a 470 m avtar utbredningen där malmen spetsar ut. De fortsätter även under denna nivå, åtminstone 130 m. Även Hassemalmen uppvisar tydliga djupaureoler. Det är alltså möjligt att se att Brusmalmen avtar mot djupet, och att inga tecken tyder på en kropp mot djupet i detta snitt. Med andra ord uppträder en klar vertikal zonering som kan utnyttjas vid djupprospektering.

Den variation hos elementen som har studerats hittills har varit elementens förhållande till malmerna och aureolerna i anslutning till dessa. Emellertid går det med hjälp av diskriminantanalys också att undersöka andra eventuella variationer, t.ex. om det finns någon skillnad i elementsammansättning mellan häng- och liggsida. En diskriminantanalys har utförts där 69 prov har tagits ut öster om malmstråket och 57 prov väster om detta (bil. 15b).

Vid analysen av grupperna hängvägg/liggvägg erhölls en tydlig elementfördelning genom hela fältet, såväl vid huvudstråket som vid 2 mindre mineraliseringar V och SV därom (bil. 15b). Denna antas vara en primär fördelning, avspeglande malmbildningsprocessen. Malmerna i fältet torde vara vulkanisk-sedimentära och sedimentationsytan vid malmernas bildningstid bör ha legat i jämnhöjd med malmerna.

Spårelementen Zn, Pb, Sb, S, As, Ag, Cu och Co är koncentrerade mot väster medan Bi-halterna är höga i öster. Detta kan tyda på att dessa element har koncentrerats ovanför malmerna i samband med att avtagande hydrotermal

aktivitet skett på havsbotten och lösningar cirkulerat genom den vulkanisk-sedimentära lagerserien i samband med kompaktionen och diagenesen.

Orsaken till att den nämnda elementfördelningen på häng- respektive liggsidan är möjliga att återfinna trots efterföljande metamorfos kan vara följande. Mineralogiska skillnader kan ha förelegat vid tiden för malmbildningen ovanför resp. under dessa, och i samband med senare metamorfos har dessa skillnader utjämnats utom i fråga om de svaga kemiska olikheter som nu föreligger på häng- resp. liggsidan. Rekristallisation kan ha skett varvid mineralogiska men ej kemiska förändringar inträffat, olikheten kan då enbart noteras efter statistisk bearbetning.

Vid senare metamorfos har en remobilisering av bl.a. spåelementen skett. Det är troligen denna process (eventuellt tillsammans med förflyttningar i elektriska fält i malmernas omgivningar) som avspeglas i de elementzoneringar som erhållits vid diskriminantanalysen av grupperna malm/bakgrund. (Bil. 15a). Dessa zoneringar kan ej vara primära då de övertvärar bergartsgränserna, och har överhuvudtaget inget egentligt samband med de bergarter som finns i fältet. (Observera att detta gäller efter normaliseringen med de använda statistiska metoderna. De variationer som har samband med de nuvarande bergarterna och den nuvarande mineralogin har tagits bort.)

Zoneringen som erhålls på detta sätt sträcker sig över 1 km från alla de kända malmerna. Samma typ av zonering förekommer också på några ställen där inga kända malmer finns. Det går således att använda denna metodik i Stollbergsfältet för att påvisa malmerna på stort avstånd i regional skala, men också i detaljerad skala. Därmed torde det också vara möjligt att påvisa dolda djupmalmer.

Det är uppenbart att avstånd och framförallt riktning till malmerna kan bestämmas på ett stort avstånd. Diskriminantscores avtar med en funktion utåt, eventuellt logaritmiskt. Därför är det möjligt att redan på ca 1.5 km avstånd i Stollbergsfältet avgöra riktningen till malmerna, och avståndet är en funktion av hur tätt isokurvorna ligger. Ju närmare malmen, ju kortare avstånd är det mellan varje kurva.

Vad beträffar allmängiltigheten hos denna undersökning kan sägas att denna metodik bör kunna lokalisera aureoler i andra malmfält av liknande typ. Även om metamorfos ägt rum, bör en elementspridning finnas som kan upptäckas

på det beskrivna sättet, vare sig spridningen är premetamorf och primär eller metamorf och sekundär.

Med fortsatt utveckling av nämnda metodik torde det kunna vara möjligt att få en effektiv metod för prospektering efter dolda djupmalmer samt för prospektering i dagen både i regional och lokal skala.

Det bör även gå att få ner borrkostnaden kraftig genom att parallellt med borrning, analysera borrkärnor och bearbeta analyserna på det sätt som beskrivits. Då riktningsangivelser till mineraliseringar, och eventuellt också avståndsangivelser, går att få fram, bör berggrundsgeokemin kunna ge ett bidrag till optimering av borrningarna och en sänkning av dessa kostnader.

Avslutningsvis vill jag också säga att ett av resultaten av de beskrivna undersökningarna är att kostnaderna går att nedbringa avsevärt. Genom glesare provtagning och ett mera selektivt val av analyserade element går det att sänka kostnaderna radikalt, men ändå få samma resultat som erhållits i dessa undersökningar.

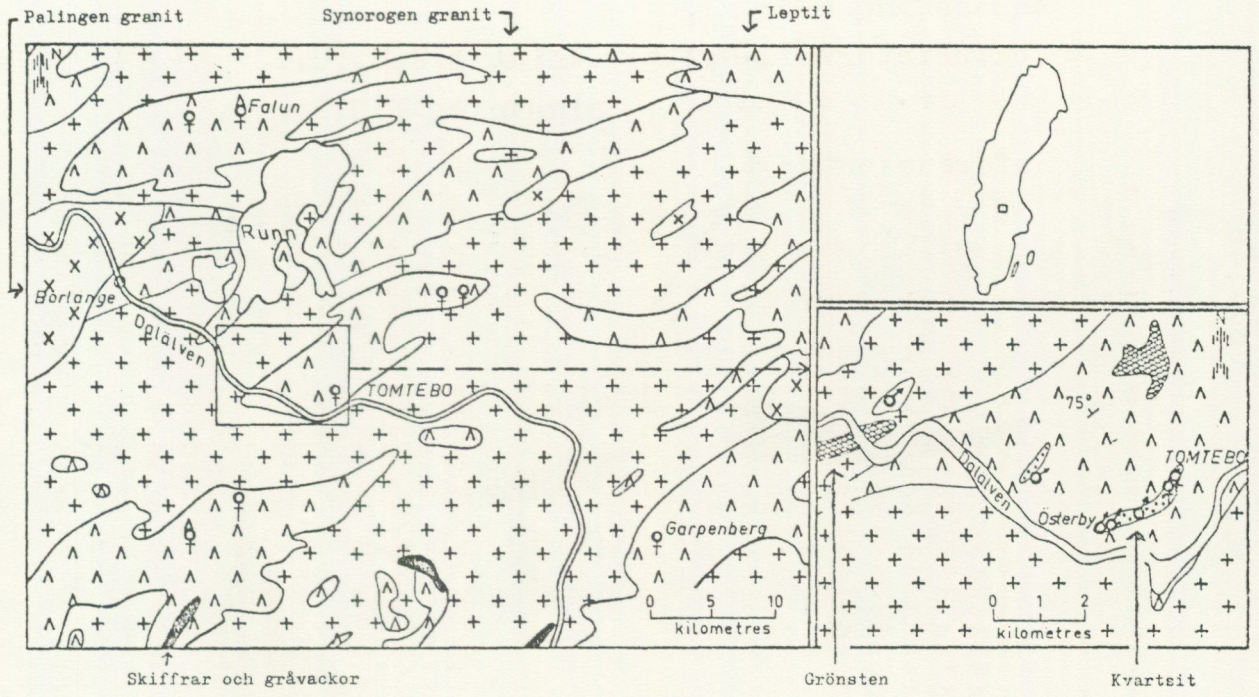
Litteraturrefrenser

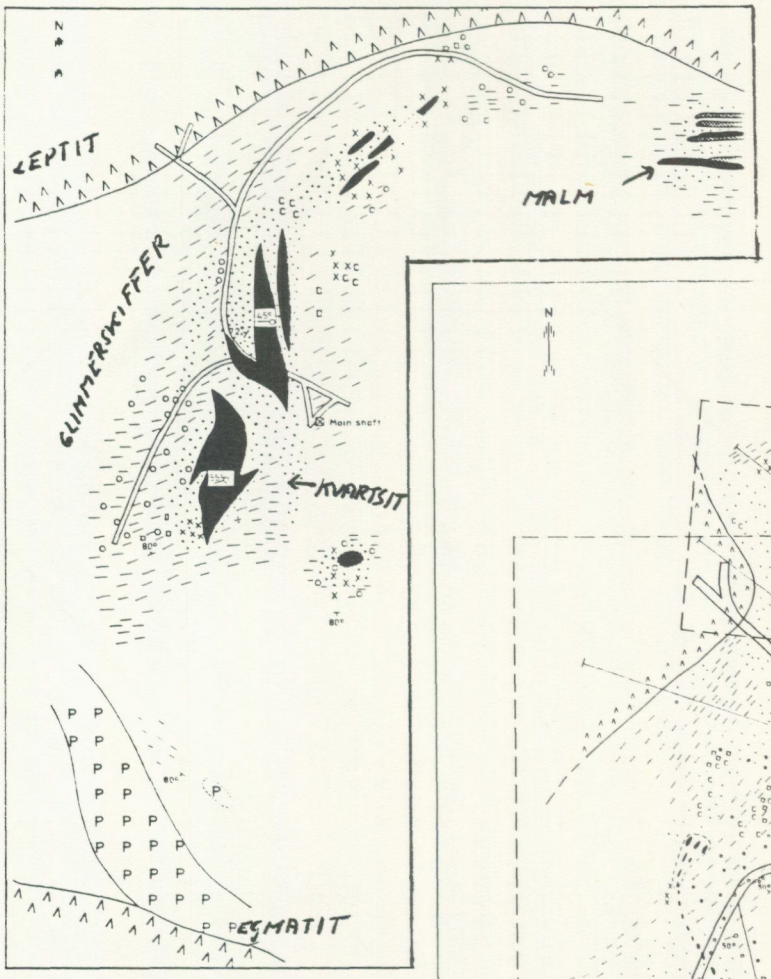
Selinus, O., 1981: Lithogeochemical exploration data in sulphide prospecting i northern Sweden.
Journ. Geochem. Explor. Vol. 15. pp 181-201.

Selinus, O., 1982. Djupprospektering med hjälp av geokemiska anomalier - berggrundsgeokemisk undersökning inom Stollbergs malmfält, Kopparbergs län.
STU rapport 80-4152 a + b. 126 pp, 32 bilagor (samt en kortare version med 31 pp, 21 bilagor).

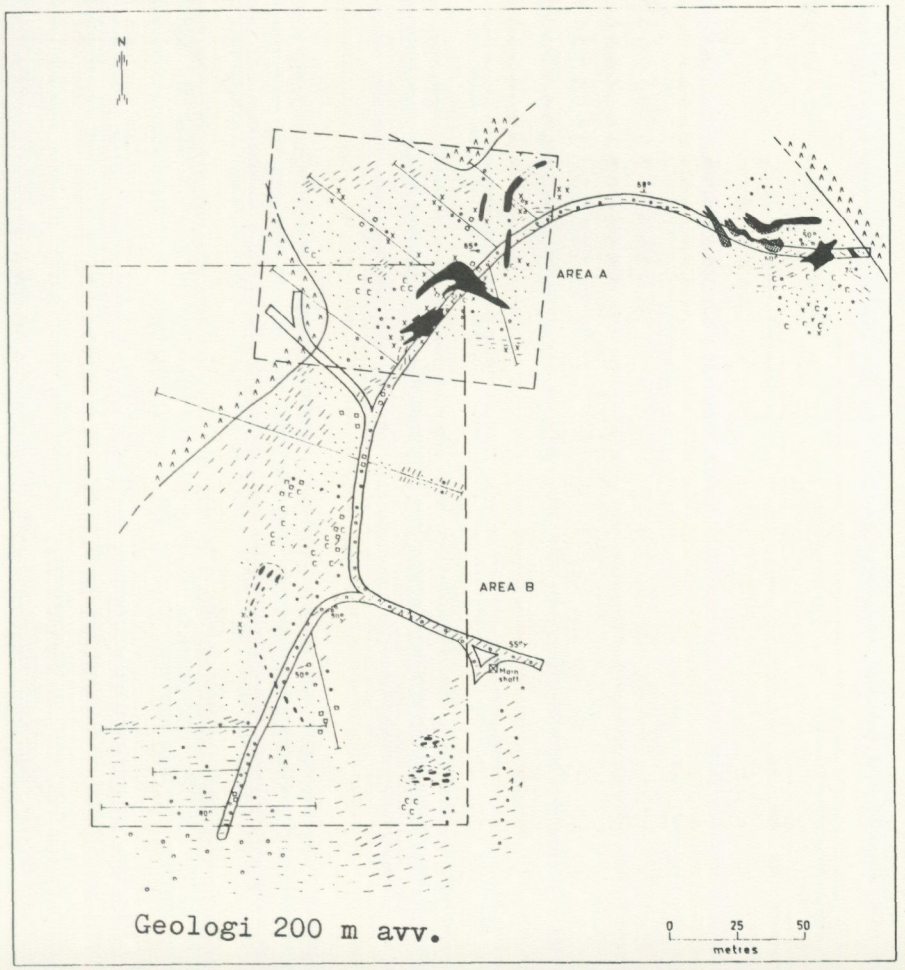
Selinus, O., 1983: Multivariate statistical analysis in lithogeochemical prospecting, as applied to an area in Central Sweden.
Journ. Geochem. Explor. In press.

Fig 1. Tomtebofältets geologi





Geologi 50 m avv.



Geologi 200 m avv.

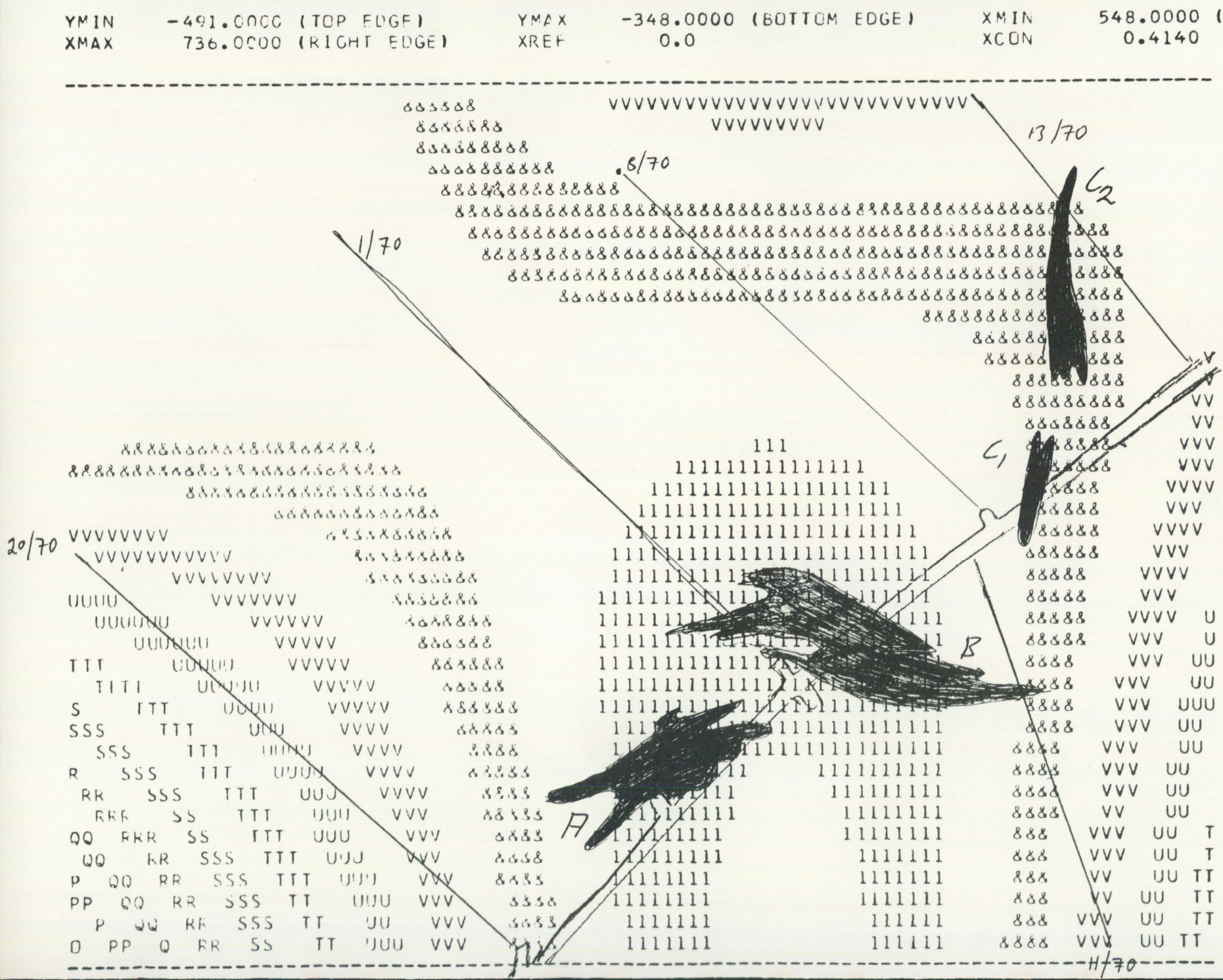

YMIN -491.0000 (TOP EDGE)
YMAX -348.0000 (BOTTOM EDGE)
XMIN 548.0000 (LEFT EDGE)
XMAX 736.0000 (RIGHT EDGE)
XREF 0.0
XCON 0.4140
1/70
6/70
13/70
20/70
H/70
A
B
C1
C2
Referenskontur=&
Konturintervall=0,41 Ökning 1,2,3,.....
minskning V,U,T.....
Anpassning 67%
A-B-C-området
Tredje gradens trendyta av faktor 1(Ag,Pb,Zn,S,FeO,Cu,Bi vsBaO)

Fig 2.

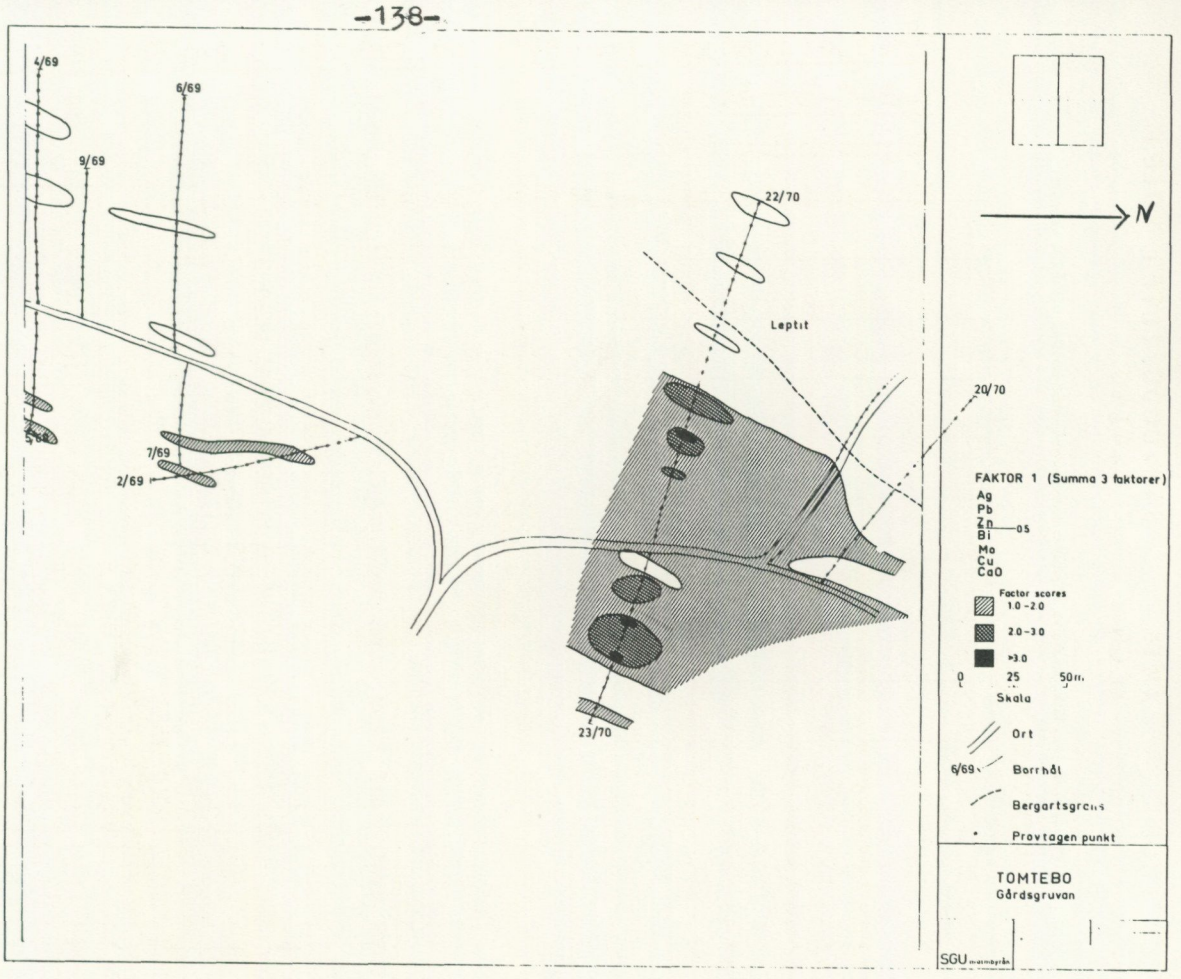

4/69
6/69
9/69
22/70
Leptit
20/70
7/69
2/69
23/70
N
FAKTOR 1 (Summa 3 faktorer)
Ag
Pb
Zn
Bi
Mo
Cu
CaO
0.5
Factor scores
1.0 -2.0
2.0 -3.0
>3.0
0 25 50m.
Skala
Ort
6/69
Borrhål
Bergartsgräns
Provtagen punkt
TOMTEBO
Gårdsgruvan
SGU malmbyrån

Fig 3

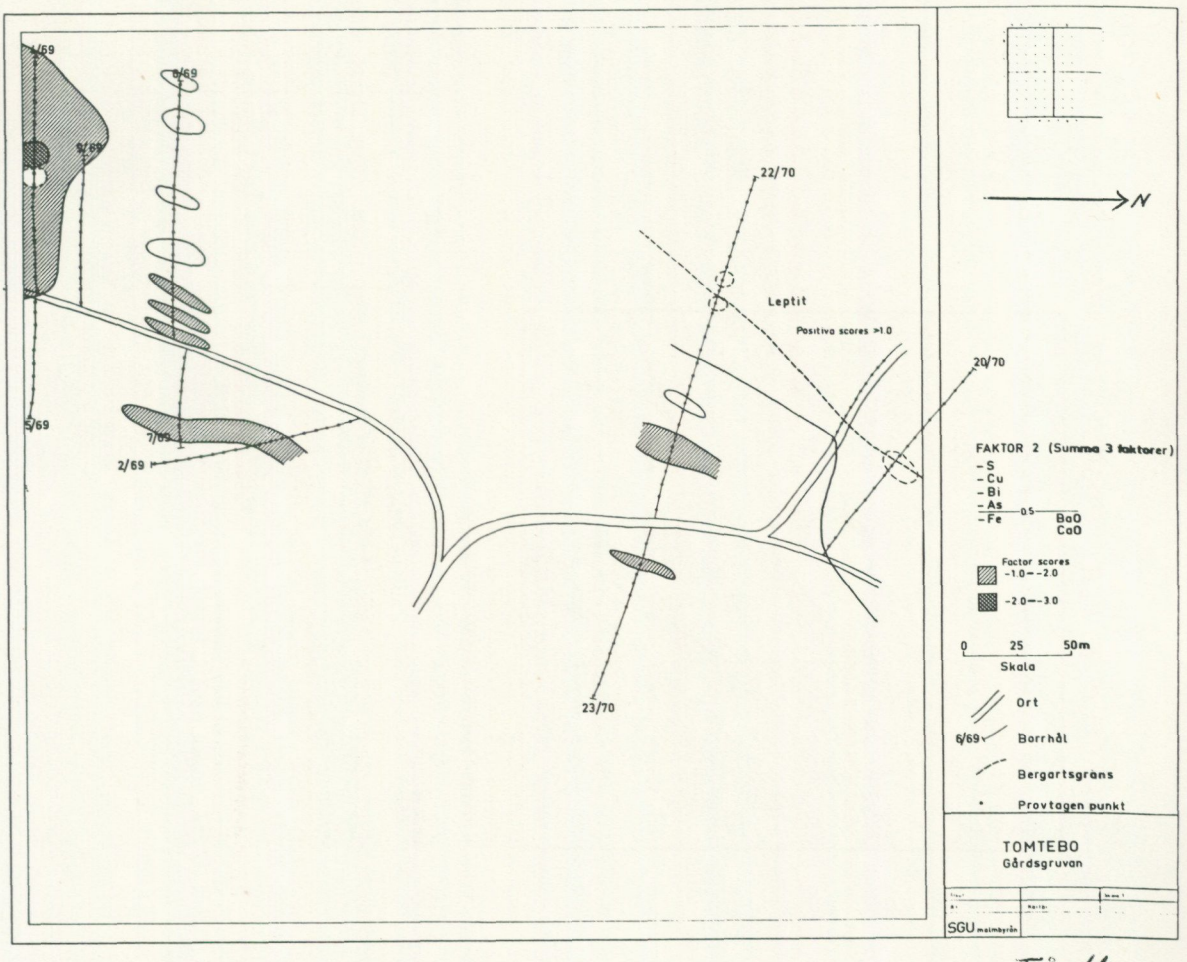
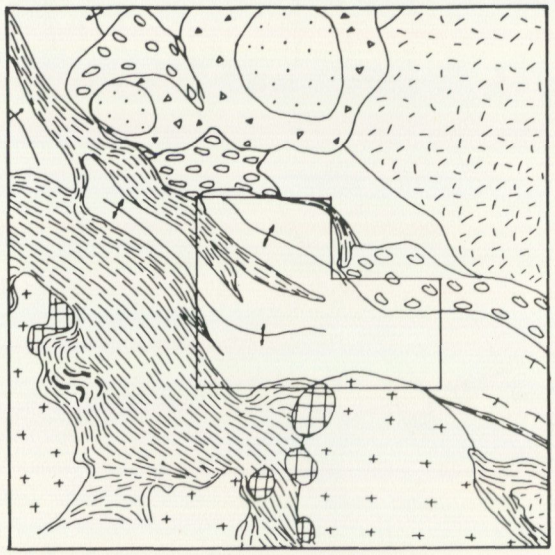
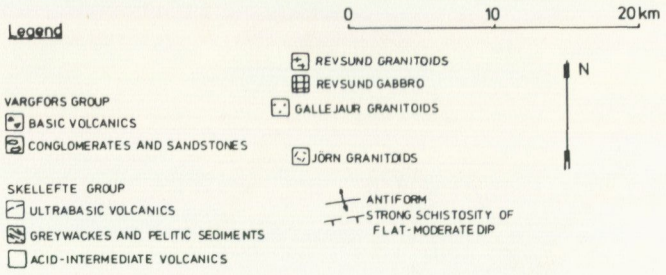

4/69
6/69
9/69
22/70
Leptit
Positiva scores >1.0
20/70
5/69
7/69
2/69
23/70
N
FAKTOR 2 (Summa 3 faktorer)
- S
- Cu
- Bi
- As
- Fe
0.5
BaO
CaO
Factor scores
-1.0 - -2.0
-2.0 - -3.0
0 25 50m
Skala
Ort
6/69
Borrhål
Bergartsgräns
Provtagen punkt
TOMTEBO
Gårdsgruvan
SGU malmbyrån

Fig 4



GENERALIZED GEOLOGICAL MAP OF THE MALÅNÄS AREA AND ITS SURROUNDINGS (from Lundberg, 1980)



Geologic map of the Malånäs area.

Fig 5.

Varimax matrix. Volcanic rocks, SELLO-transformation, Malånäs district, 987 samples les

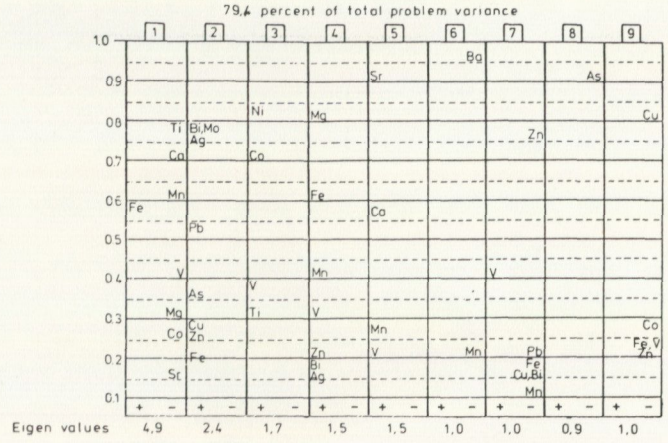
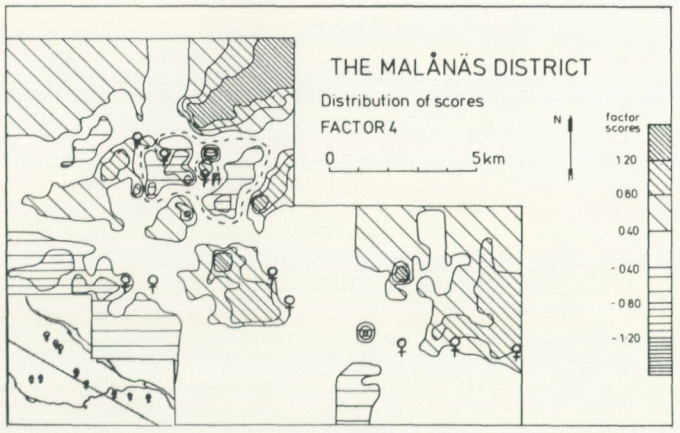
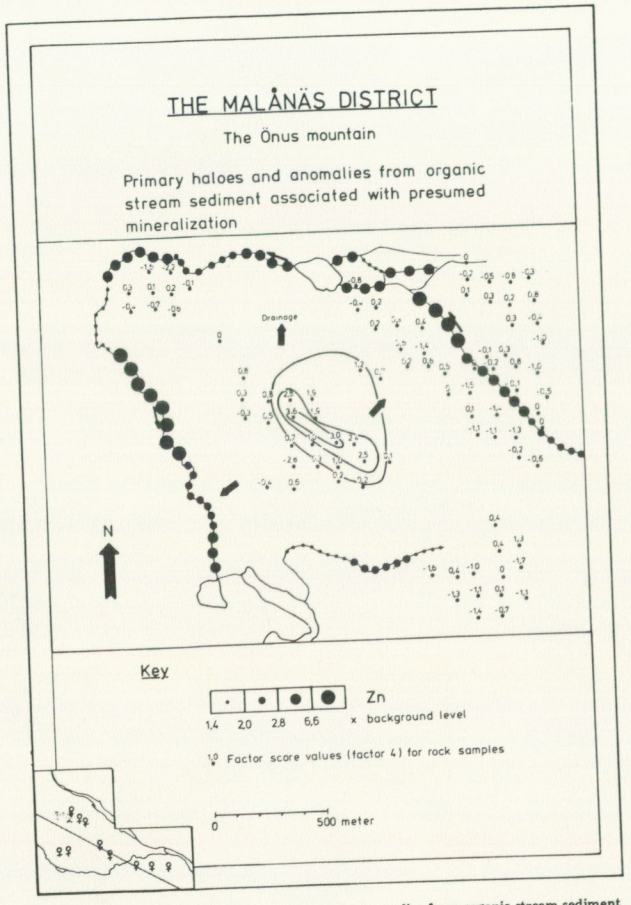


Fig 6.



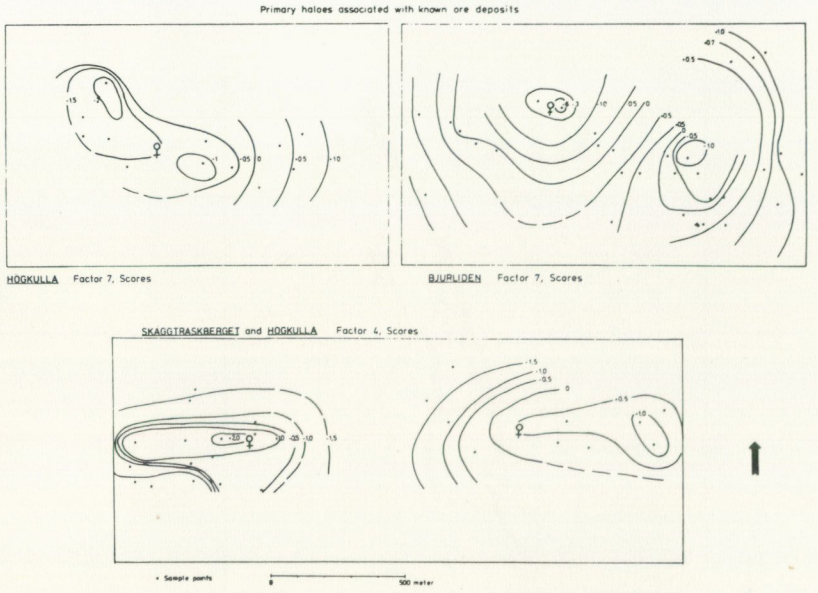
Distribution of scores. Factor 4.

Fig 7.



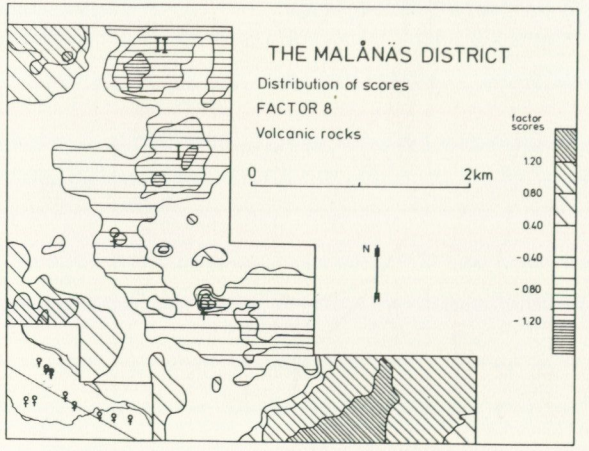
The Önus mountain. Primary haloes and anomalies from organic stream sediment associated with presumed mineralization.

Fig 8.



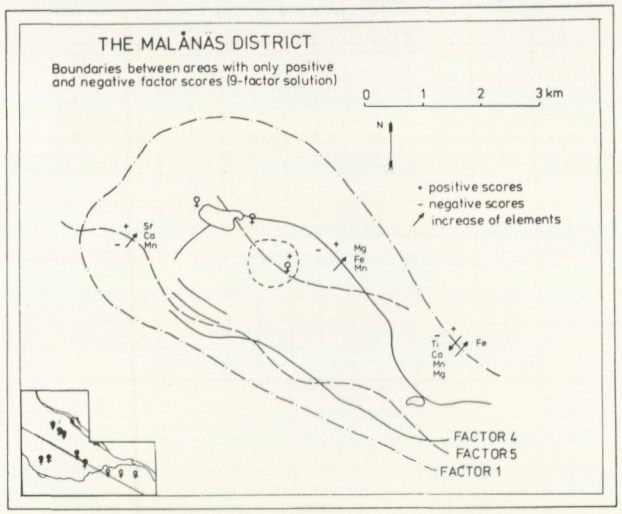
Primary haloes associated with known ore deposits.

Fig 9.



. Distribution of scores. Factor 8.

Fig 10.



Boundaries between areas with only positive and negative factor scores (9-factor solution).

Fig 11.

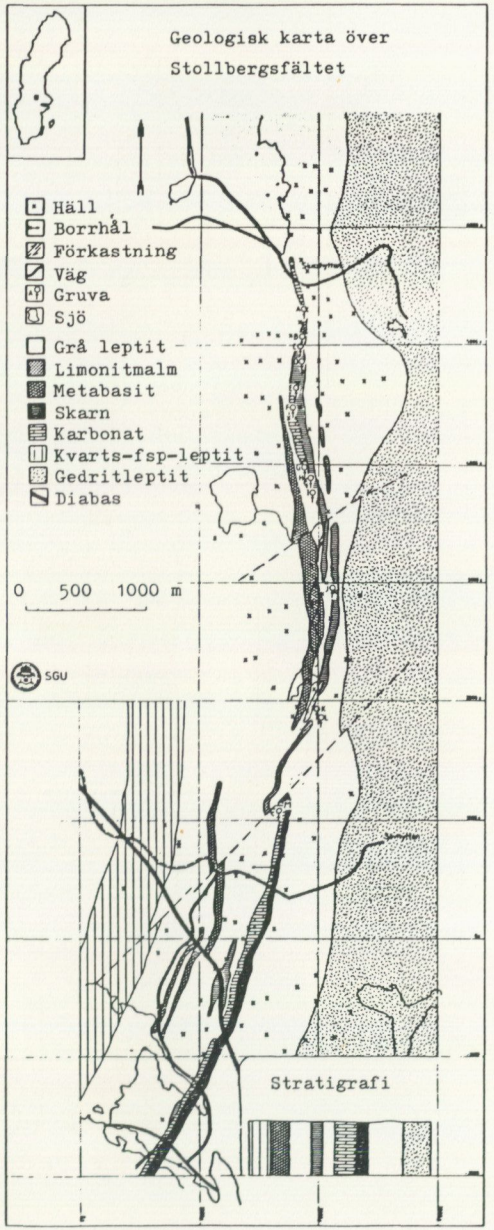


fig 12.

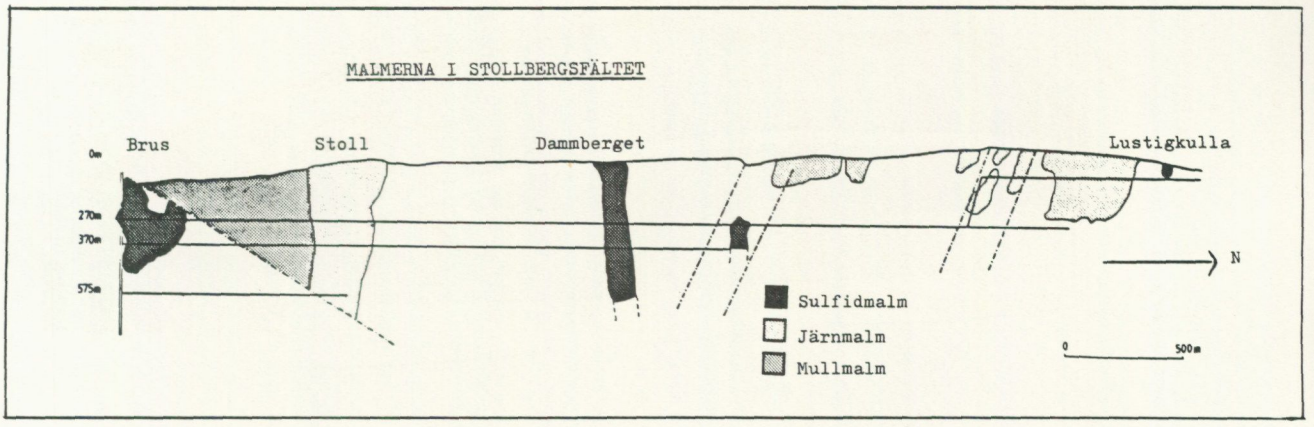

MALMERNA I STOLLBERGSFÄLTET
Brus
Stoll
Dammberget
Lustigkulla
0m
270m
370m
575m
N
Sulfidmalm
Järnmalm
Mullmalm
0
500m

Fig 13

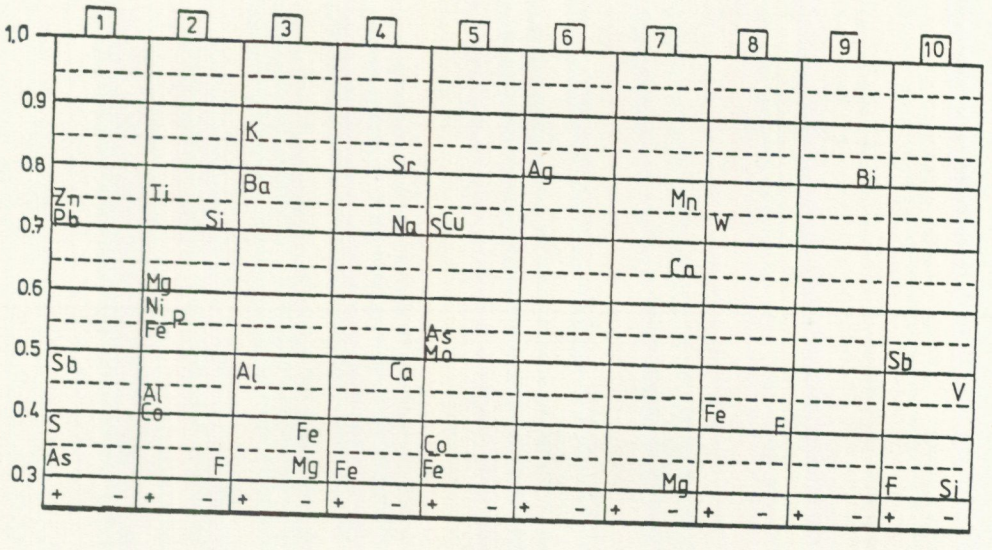

1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Zn
Pb
Ti
Si
Mg
Ni
Fe
P
Sb
Al
Co
S
As
F
K
Ba
Fe
Mg
Sr
Na
Ca
Fe
Ag
Cu
As
Mo
Co
Fe
Mn
Ca
Mg
W
Fe
F
Bi
Sb
V
F
Si
+ - + - + - + - + - + - + - + - + - + -

Fig 14

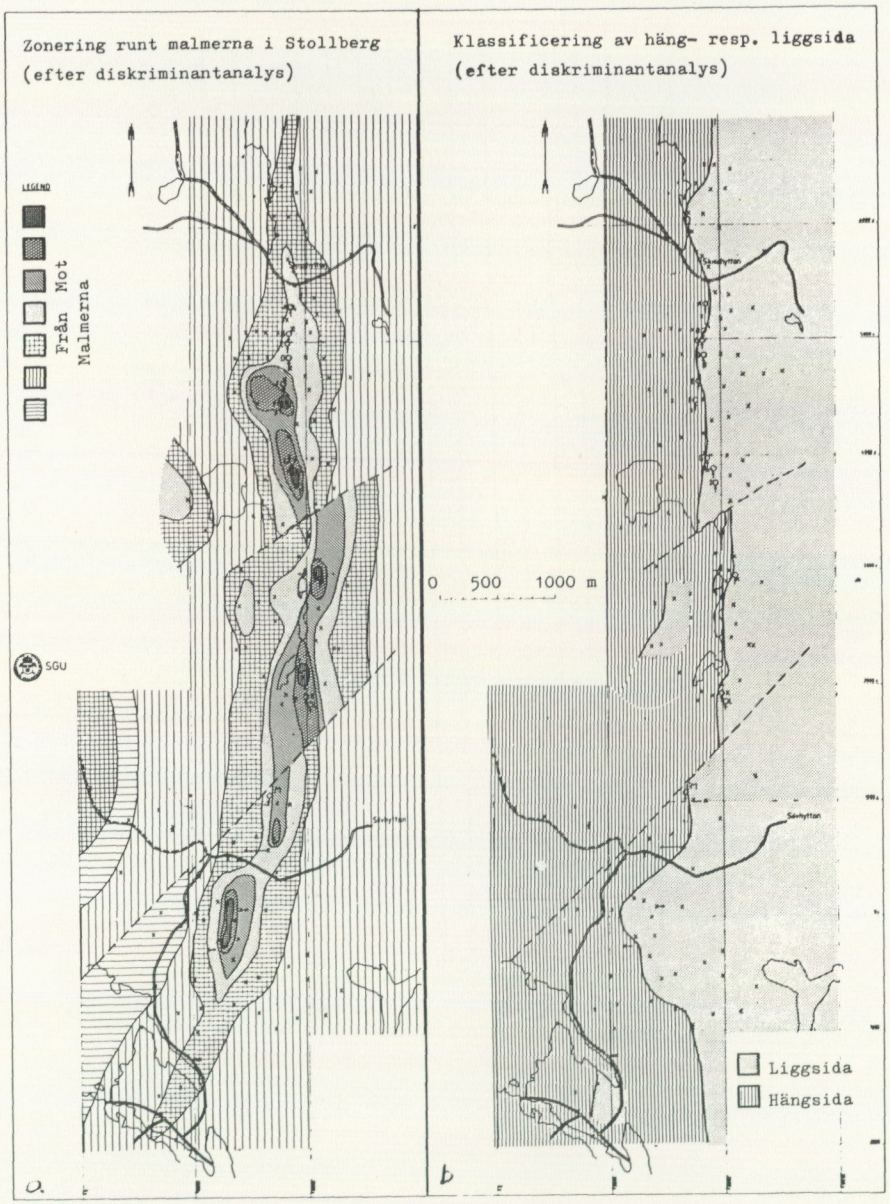
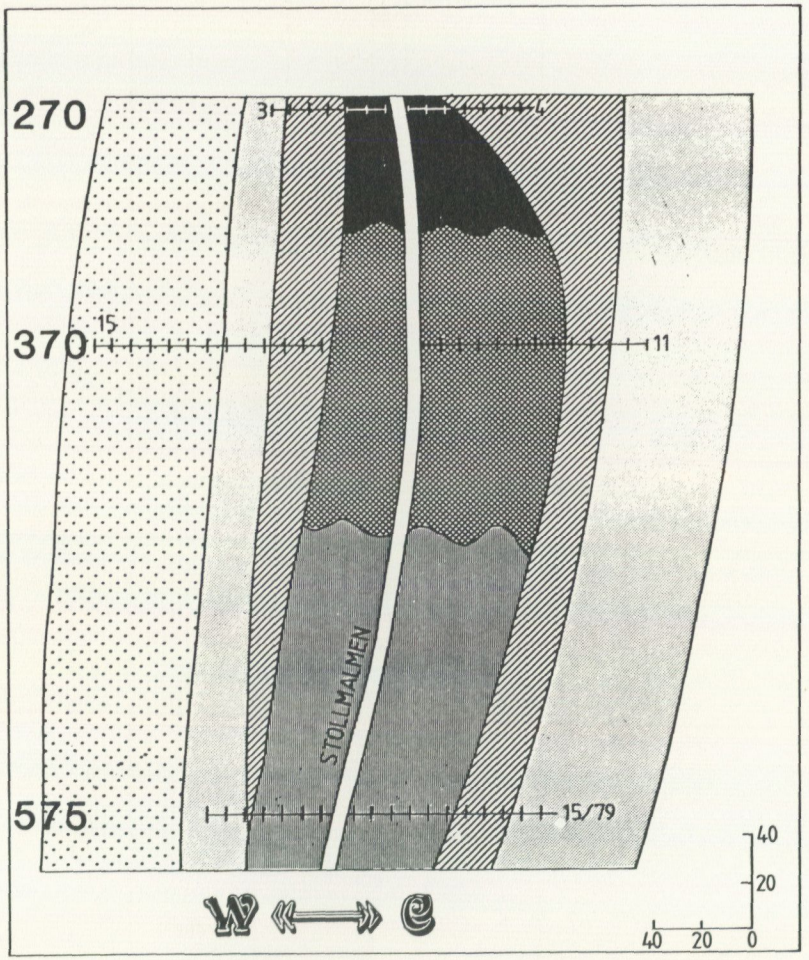


Fig 15.

Vertikal zonering (diskriminantscores) vid Stollmalmen



Legend

>0		-2,2	
0- -1		-2,3	<-2
-1- -2		-2,4	
Borrhål			

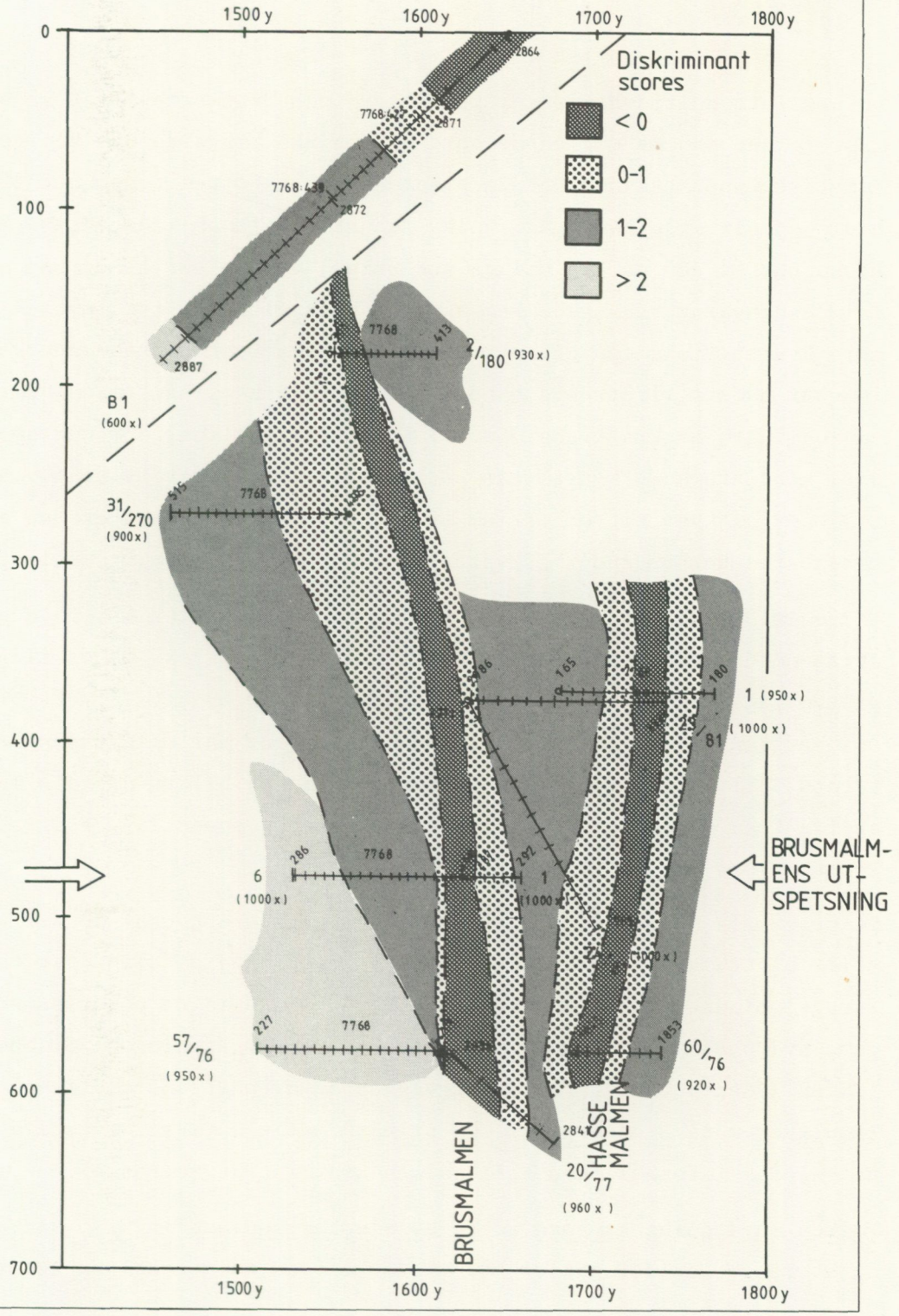
Siffervärdena anger "diskriminantscores". Ju större det negativa värdet är - desto närmare malmen.

Fig 16.

Fig 17.

STOLLBERG

Vertikalprofil strax söder om Brusmalmen.



ASPEKTER PÅ SIDOBERGSOMVANDLING I SAMBAND MED PROSPEKTERING

Per Hedström
Bolaget Vieille-Montagne
690 42 ZINKGRUVAN

De komplexa sulfidmalmerna i Bergslagen och Skelleftefältet är genetiskt associerade med de omgivande sura vulkaniska bergarterna. Enligt nyare malmgenetiska uppfattningar är de bildade på havsbotten genom utfällning från hydrotermala malmlösningar, vilka trängt upp genom kanaler, sprick- och krosszoner i den då befintliga submarina, vulkaniska berggrunden. De varma malmlösningarna reagerade kemiskt med vulkaniterna, som omvandlades till mera kvartsitiska och glimmerrika bergarter. Denna metasomatiska omvandling innebar både tillförsel och borttransport av kemiska komponenter. Sidobergsomvandlingen är kraftigast intill lösningskanalerna, där det som regel bildats kloritförande kvartsiter, och avklingar successivt utåt genom övergång till sericitkvartsit och friska vulkaniter. Beroende på graden av senare metamorfos har omvandlingskvartsiterna erhållit olika mineralogisk dräkt.

När malmlösningarna slutligen nått upp mot havsbotten har på och eventuellt strax under denna malmerna utfällts från lösningarna. Man skiljer mellan proximala och distala malmer. De proximala har avsatts direkt ovanför den sidobergsomvandlade stratigrafiska liggväggen. Har malmlösningarna transporterats bort från de submarina utloppskanalerna bildas distala malmer, avskilda från malmlösningskanaler och sidobergsomvandling. Flertalet av de svenska komplexa sulfidmalmerna är proximala.

De proximala malmernas stratigrafiska hängvägg uppvisar som regel ingen eller blott svag sidobergsomvandling. I det senare fallet sträcker den sig i regel mindre än 50 m ut ifrån malmen. Omvandlingen beror sannolikt på svagare hydrotermal aktivitet efter själva malmavsättningen. Sidobergsomvandlingen i den stratigrafiska liggväggen är av helt andra dimensioner, som lämpligen mäts i enheten km. De primära metasomatiska omvandlingsaureolerna är således i förhållande till malmen kraftigt asymetriska.

Vilken användning kan man då ha av sidobergsomvandlingar i samband med prospektering? När det gäller att upptäcka proximala komplexa sulfidmalmer kan

de vara till stor hjälp. Omvandlingsbergarterna i dessa malmers stratigrafiska ligg upptar som regel en avsevärt mycket större volym än vad malmerna gör. Den omfattande yttre zonen med sericitkvartsit eller dess metamorfa motsvarighet indikerar närhet till malm. Kloritkvartsitiska zoner i sericitkvartsit kan vara äldre malmlösningskanaler, som om de följs i den stratigrafiska uppåtriktningen kan leda till malm. Då man planerar undersökningar i område med proximala malmer, t.ex. en undersökningsort i en gruva, bör man tänka på att man får mer upplysningar om sidobergsomvandlingar och malmlösningskanaler, och därmed indirekta indikationer på malm, om undersökningarna förläggs i den stratigrafiska liggväggen i stället för i hängväggen. Från en i den stratigrafiska liggväggen belägen ort, som övertvärar malmlösningskanaler (kloritiska kvartsiter), kan man på ett tidigt undersökningsstadium rikta borrhål mot de mest malmpotentiella områdena. Inledande borrning från en motsvarande undersökningsort i den stratigrafiska hängväggen får mer statistisk karaktär.

För att närmare belysa relationen malm- sidobergsomvandling i proximala malmsystem följer nedan beskrivningar från två gruvor, nämligen Rävlidmyrgruvan i västligaste Skelleftefältet och Gränsgruvan i västra Bergslagen.

Rävlidmyrgruvan

I Rävlidmyrgruvan uppträder inom en kraftigt veckad malmzon ett flertal malmer på något olika stratigrafiska nivåer (fig. 1). Malmerna kan i stort indelas i en nordlig och en sydlig grupp. De stratigrafiskt inunder malmzonen (mot öster) förekommande vulkaniterna har till största delen omvandlats till sericitkvartsit och en tät delvis kloritisk kvartsit med spår av kopparkis (i fig. 1 betecknad som kvartsit). Den senare kvartsiten, som uppträder i stråk direkt inunder de två malmgrupperna, är att betraktas som centra för sidobergsomvandling och tillförseln av malmlösningar. Det norra stråket med kopparkisförande kloritkvartsit skär stratigrafin diskordant i 20-25° vinkel. Utanför figur 1 kan sericitkvartsiten följas flera km österut. Även om sidobergsomvandlingen är helt koncentrerad till malmernas stratigrafiska liggvägg förekommer i den norra malmgruppens stratigrafiska hängvägg viss omvandling av tufferna 10-50 m ut från malmen (fig. 1).

Gränsgruvan

I Gränsgruvan, som är belägen i en veckomböjning, är åtta Zn-Pb-malmer kända (fig. 2). Inom malmzonen, som består av en mer eller mindre skarnig röd leptit, uppträder malmerna utmed två horisonter. A, D, F_1, K, G och L malmerna utgör den stratigrafiskt lägsta horisonten medan S (schaktmalmen), F_2 och M uppträder i den högre. Malmzonen överlagras av kalksten och grå leptit. Malmernas stratigrafiska ligg utgöres av en röd leptit, som till största delen är omvandlad till muskovitkvartsit (sericitkvartsitens metamorfa motsvarighet) och andalusitkvartsit förande biotit, cordierit och granat (kloritkvartsitens metamorfa motsvarighet). I muskovitkvartsiten finns här och var rester av röd leptit. Figur 3 är ett försök till rekonstruktion av den geologiska situation som rådde vid malmbildningens upphörande strax före kalkutfällningen. Tillsynes utgör F-malmen den centrala delen i malmsystemet. I figurerna 4 och 5, som är vertikala längdprofiler av de två malmhorisonterna, har veckomböjningen söder om F-malmen rätats ut. Figurerna återspeglar fördelningen av omvandlingsbergarter i malmernas omedelbara stratigrafiska ligg, dvs. på vilka bergarter som malmerna avsatts. Av figurerna 4 och 5 framgår att malmerna liksom stråken av andalusitkvartsit har en utdragen form. Andalusitkvartsiten, som är den mest sidobergsomvandlade bergarten, representerar med stor sannolikhet malmlösningarnas tillförselkanaler. Sidobergsomvandlingen är genomgående kraftigast direkt inunder malmerna. I den stratigrafiskt lägre malmhorisonten (fig. 4) har varje malm förutom G-L-malmen sin egen tillförselkanal. Under den övre malmhorisonten (fig. 5) finns betydligt mindre mängd av omvandlingsbergarter. Andalusitkvartsit finns bara under F_2-malmen. I den övre delen av gruvan har S-malmens stratigrafiska ligg inte omvandlats. Mot djupet tilltar emellertid muskovitkvartsiten i omfattning samtidigt med att malmens mäktighet ökar. Eventuellt finns S-malmens tillförselkanal (andalusitkvartsit) på ännu större djup.

I malmzonen liksom i kvartsitzonen förekommer rester av röd kvartsfältspatleptit, vilken har en mycket konstant kemisk sammansättning (tabell 1, kolumn 3). Leptiten uppträder på ett sådant sätt att den måste betraktas som den "ursprungliga" bergarten i kvartsitzonen och att den i malmzonen avsattes tillsammans med malmlösningarnas utfällningsprodukter. I malmzonen är den röda leptiten mer eller mindre skarnig och sulfidmineraliserad.

I kvartsitzonen har den till mycket stor del omvandlats till muskovit- och andalusitkvartsit med rikliga inslag av FeS och FeS_2. I tabell 1 har den röda leptiten relativt höga halter av kalkofila element. Detta beror på att proverna är tagna i malm- och kvartsitzonen. Den kemiska medelsammansättningen för kvartsitzonen (leptiter + kvartsiter) skiljer sig inte nämnvärt från medelsammansättningen för leptiter i malmzonen (tabell 1). Kvartsitzonen har jämfört med malmzonens leptiter högre halter av framförallt Fe_2O_{3tot}, S, Cu, Bi, Sn, men lägre halter av K_2O, Zn, Pb, Sb och As. Jämfört med den röda leptiten är både kvartsit- och malmzonen, dvs, "malmsystemet", anrikat på förutom kalkofila element även Fe_2O_{3tot}, MnO, MgO, CaO och S.

Figur 6A och 6B visar den kemiska variationen i kvartsitzonen över bergartsleden leptit, muskovitleptit, muskovitkvartsit och andalusitkvartsit. Vid ökad omvandling, dvs. ju närmre andalusitkvartsiten man kommer, ju högre blir halterna av Fe_2O_{3tot}, MgO, MnO, S, Cu, Bi och Sn, medan halten av framförallt K_2O minskar. Även halterna av SiO_2, Na_2O, BaO och i mindre grad Al_2O_3 avtar med ökad sidobergsomvandling.

För att utröna om man med faktoranalys kan urskilja de olika geologiska och geokemiska komponenterna i ett proximalt malmsystem utfördes faktoranalys på kemiska analyser från den grå leptiten, malmzonen och kvartsitzonen. Resultatet framgår av tabell 2. De tre dominerande faktorerna är i rangordning 2, 3 och 1. De representerar mycket centrala komponenter i ett proximalt malmsystem. Faktor 2 representerar sidobergsomvandlingen, anrikning av Mg och Fe_{ox} samt minskning av K och Si, främst i andalusitkvartsiten. Fe_{ox} och S_{Fe} i tabell 2 representerar totalhalten av icke sulfidbundet järn, respektive järnbundet svavel. Själva Zn-Pb-Ag-mineraliseringen i malmzonen återspeglas av faktor 3. Faktor 1 representerar FeS_2- FeS-$CuFeS_2$-mineralisering i kvartsitzonen.

Tabell 3 visar faktoranalys av prover enbart från kvartsitzonen. I stort kommer samma faktorer fram som i tabell 2. Faktor 3 representerar sidobergsomvandlingen och dess scores visar tydligt den ökade omvandlingsgraden vid övergången från leptit till andalusitkvartsit. Speciellt tydligt framkommer andalusitkvartsiten, dvs. malmlösningskanalerna.

FeS_2- FeS - $CuFeS_2$-mineraliseringen är inte koncentrerad till någon speciell omvandlingsbergart. De låga scoresmedelvärdena i muskovitleptiten, muskovitkvartsiten och andalusitkvartsiten beror på att FeS_2 och FeS till stor del

uppträder oregelbundet i ådror. Därmed blir scoresvärdena omväxlande positiva och negativa, vilket resulterar i låga medelvärden.

Slutsatser

Angående malmernas sidobergsomvandling i Rävlidmyrgruvan, Gränsgruvan och i anslutning till proximala komplexmalmer i allmänhet, kan följande konstateras:

- Malmernas stratigrafiska liggvägg är kraftigt sidobergsomvandlad medan den stratigrafiska hängen uppvisar ingen eller blott svag omvandling.
- I den omvandlade stratigrafiska liggen kan oftast urskiljas ett centralt parti med kraftigare omvandling, vilket med stor sannolikhet utgör själva malmlösningskanalen.
- Förekommer flera malmkroppar i ett proximalt malmsystem har ofta den enskilda malmkroppen eller malmgruppen en egen malmlösningskanal med tillhörande omvandling av sidoberget.
- Sidobergsomvandlingen utav leptiten i Gränsgruvan karakteriseras kemiskt främst av en tillförsel av Mg och Fe samt borttransport av K och i mindre grad Na. För övrigt finns en anrikning av FeS och FeS_2 samt Cu, Bi och Sn i de omvandlade bergarterna. I stort torde det ovannämnda gälla för de flesta sidobergsomvandlingar som är knutna till proximala komplexmalmer.
- Ur prospekteringssynpunkt utgör sidobergsomvandlade bergarter en indikation på malm.
- Malmlösningskanaler (kloritiska kvartsiter) avslutar stratigrafiskt uppåt ofta i malm. De är således ur prospekteringssynpunkt mycket intressanta.
- Undersökningsorter och diamantborrning som förläggs i de proximala malmernas stratigrafiska ligg ger mer upplysning om sidobergsomvandling och malmbildning än om de vore förlagda i den stratigrafiska hängen.

I samband med prospektering ovan och inte minst under jord är det väsentligt att kunna identifiera malmassocierade omvandlingsbergarter. I detta sammanhang är geokemin mycket användbar. Vidare är geokemin ett viktigt instrument för att få bättre insikt i de malmbildande processerna, vilket i sin tur kan leda till en effektivare prospektering. Vid geokemisk prospektering i fast klyft är omvänt kunskapen om sidobergsomvandling och malmbildning ytterst väsentlig för tolkningen av erhållna mätvärden.

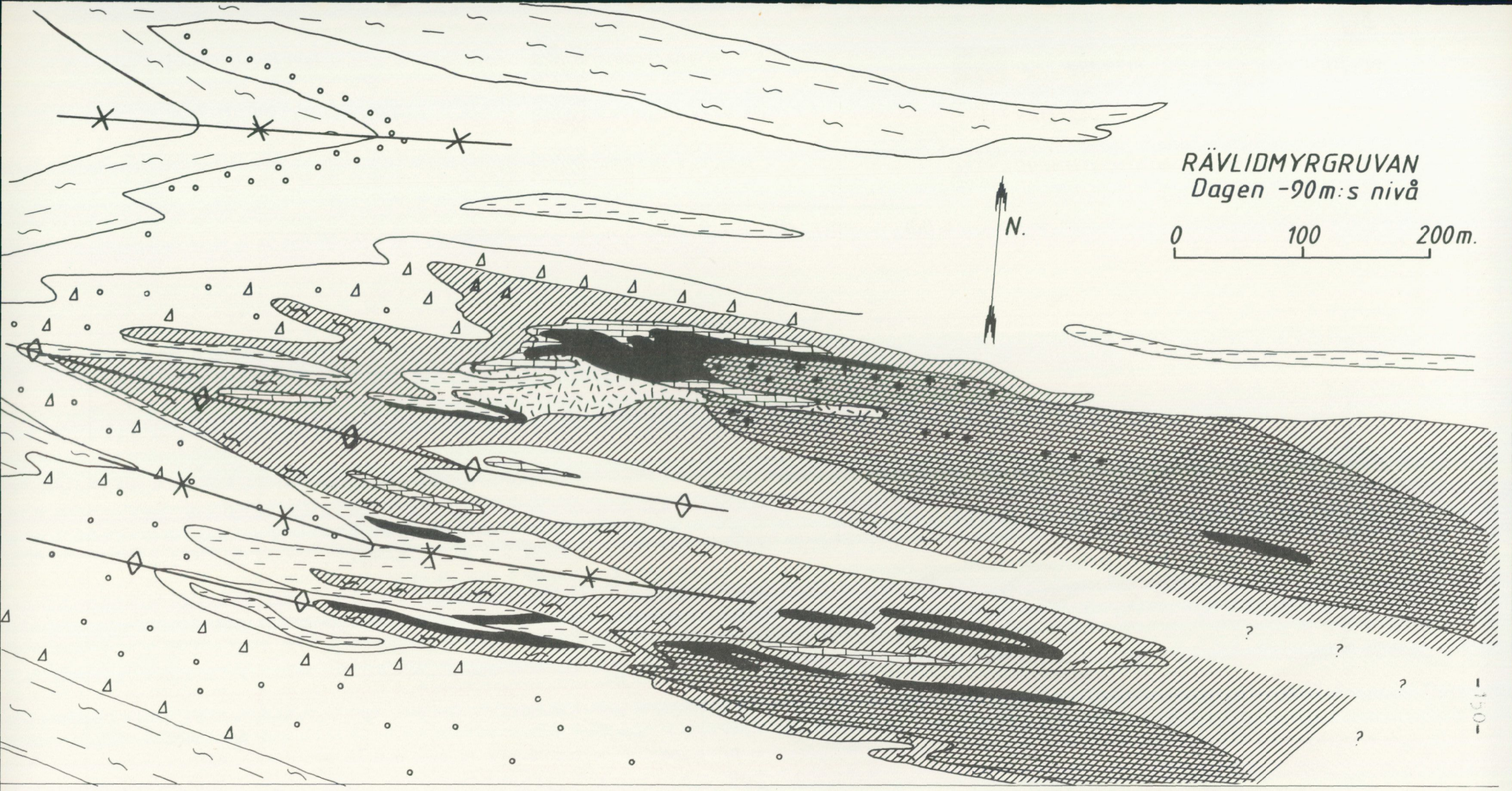

RÄVLIDMYRGRUVAN
Dagen -90m:s nivå
N.
0
100
200m.
Tuff, ryolitisk
Tuffit, kalkig
Kalkig bergart
Lapillituff
Fältspatporfyr
Kalksten
Sericitkvartsit
Kvartsit
Täljsten
Svartskiffer
Kopparkisimp.
Sulfidmalm
Antiklinal
Synklinal

Fig. 1

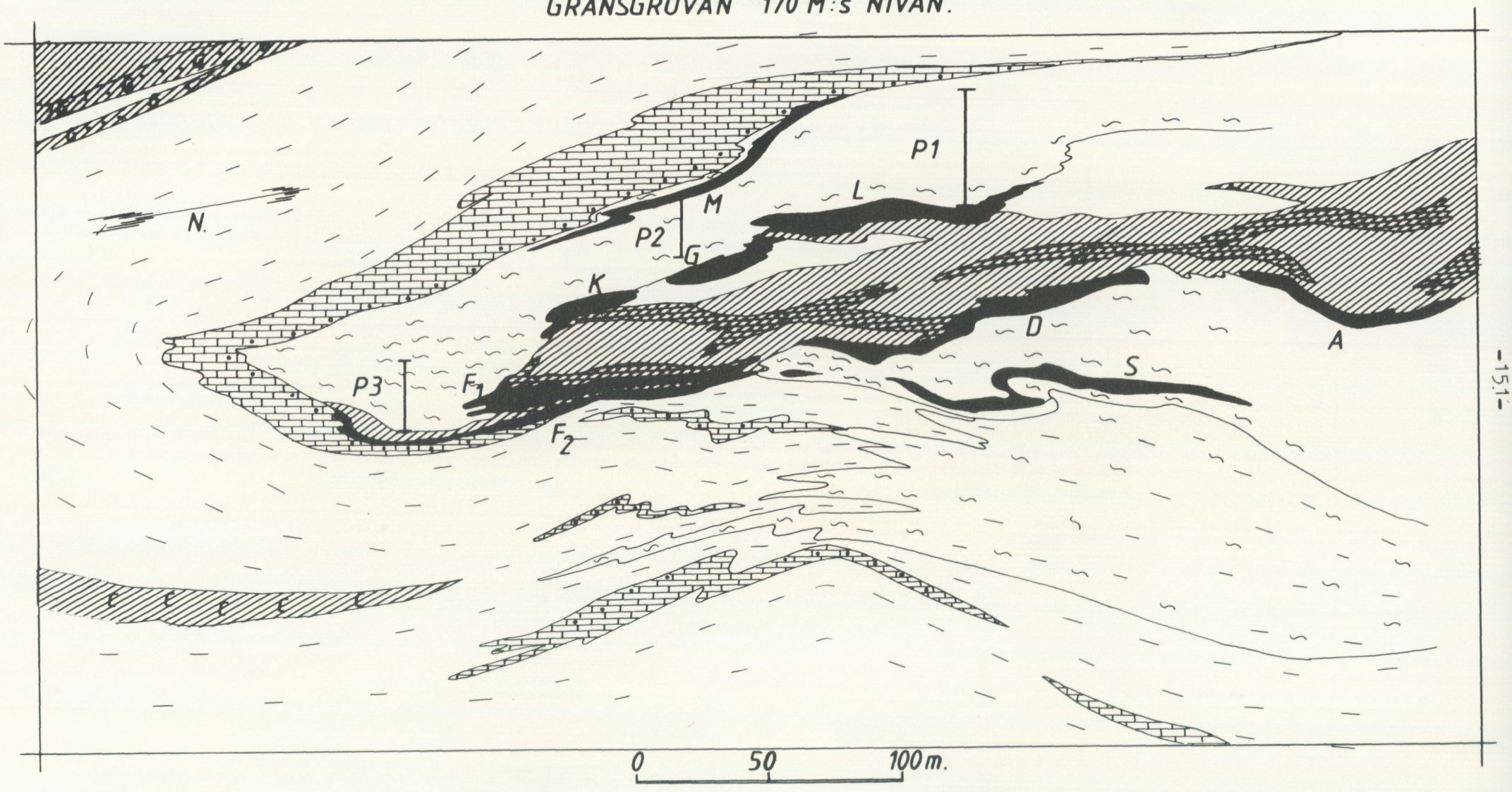
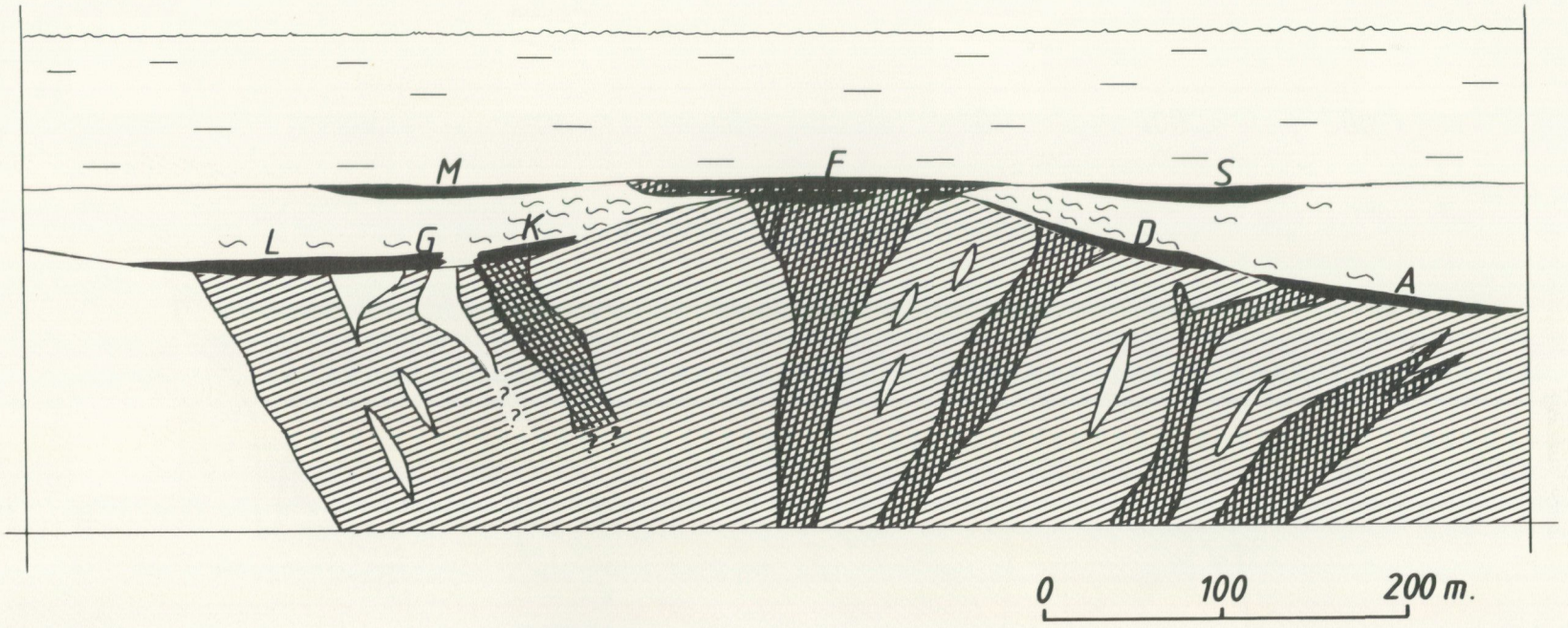

GRÄNSGRUVAN 170 M:s NIVÅN.
N.
P1
L
M
P2
G
K
D
A
S
P3
F1
F2
0
50
100 m.
Leptit, röd
Leptit, grå (tuff - tuffit)
Skarnig bergart
Muskovit kvartsit
Andalusit kvartsit
Granatkvartsit
Glimmerskiffrig leptit, med cordierit ± andalusit
Kalksten
Zn - Pb-malm
Magnetit imp.

Fig. 2



Leptit

Leptit, skarnig

Muskovit kvartsit

Andalusit kvartsit

Malm

Vatten

Fig. 3

Gränsgruvan, fördelning av omvandlingsbergarter stratigrafiskt inunder malmerna i den stratigrafiskt lägsta malmhorisonten.

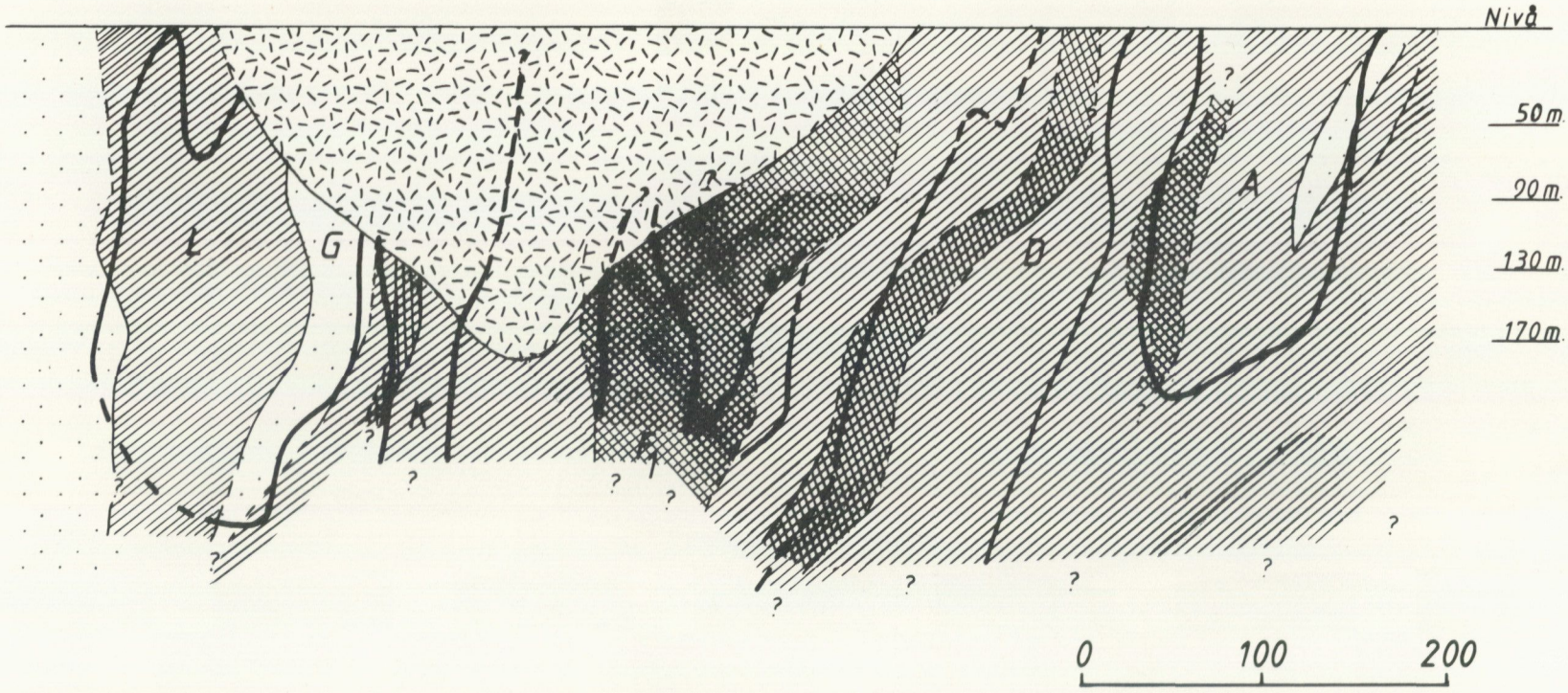


Fig. 4

Gränsgruvan, fördelningen av omvandlingsbergarter stratigrafiskt inunder malmerna i den stratigrafiskt övre malmhorisonten.

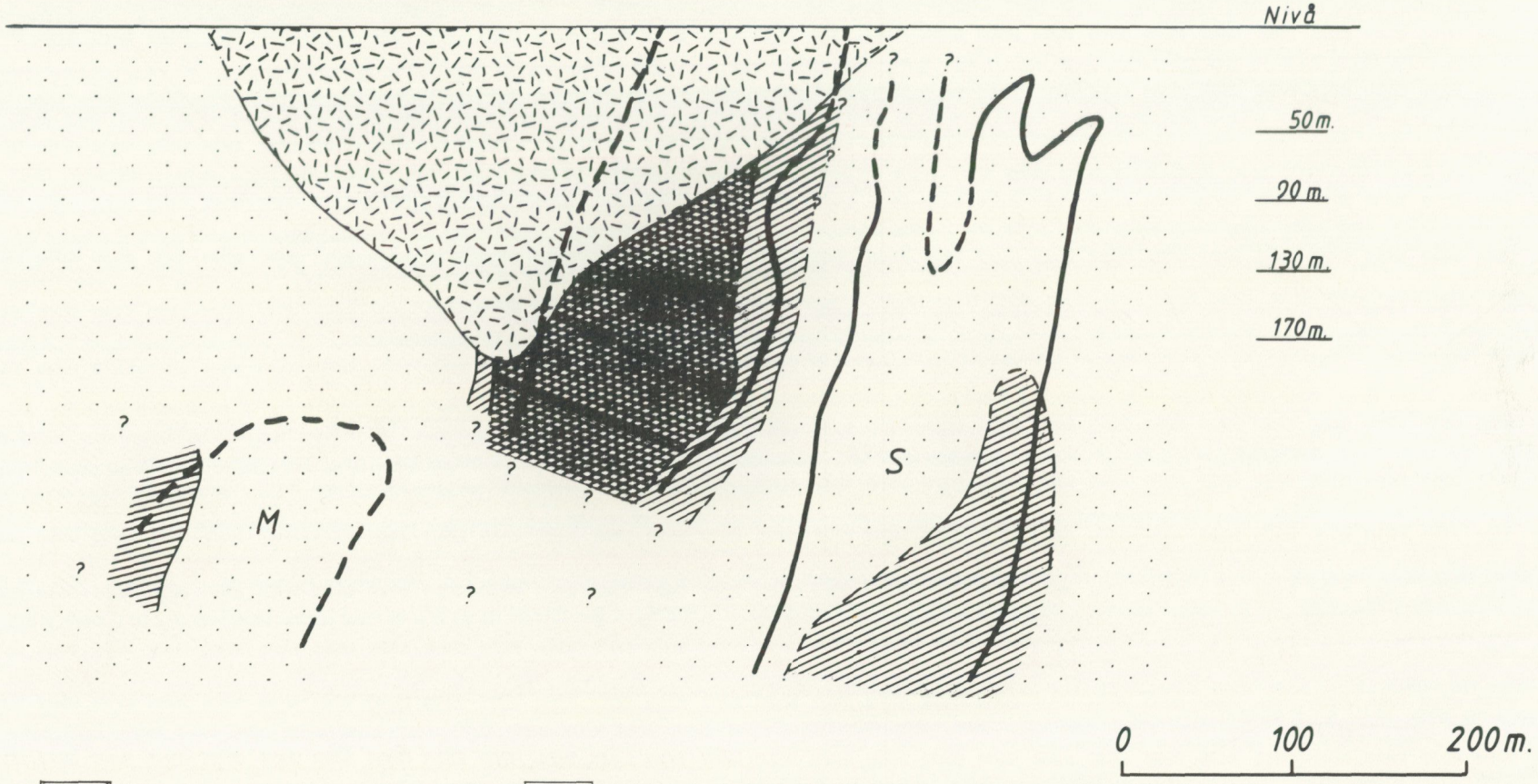


Fig. 5

Gränsgruvan, kemiska variationer i kvartsitzonens leptiter - kvartsiter

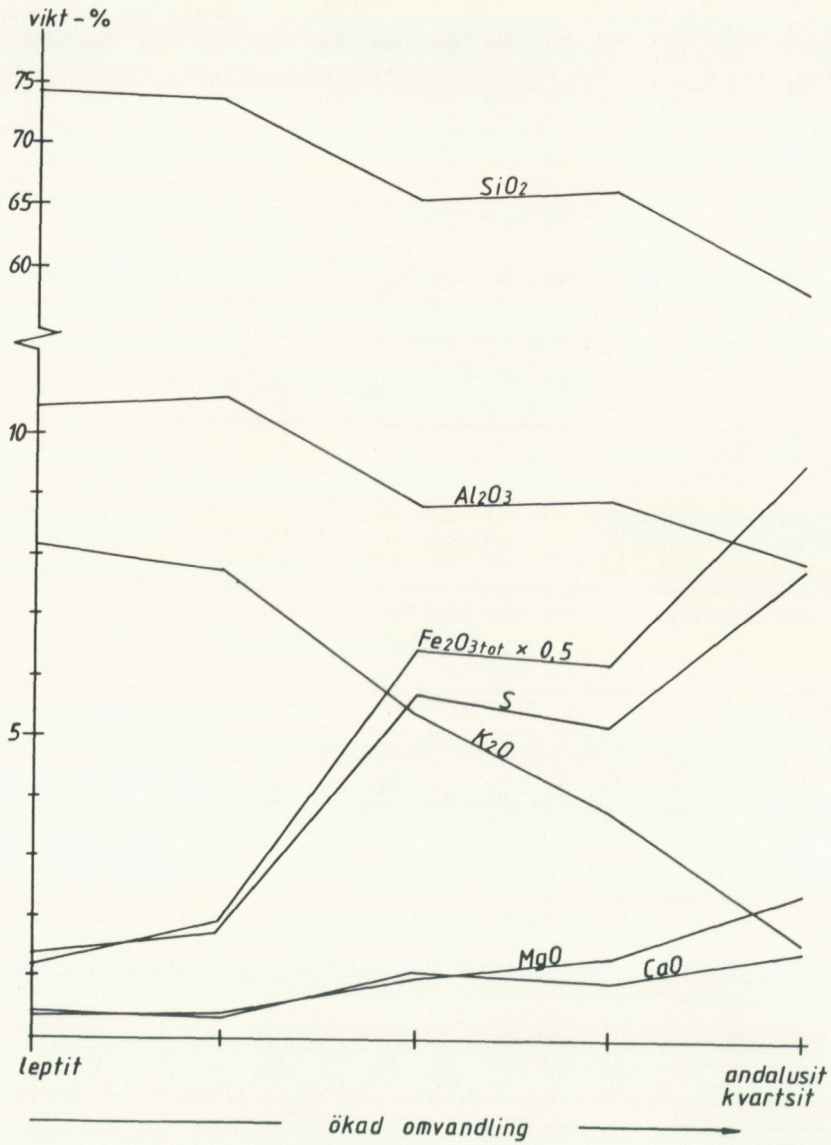


Fig. 6A

Gränsgruvan, kemiska variationer i kvartsitzonens leptiter - kvartsiter

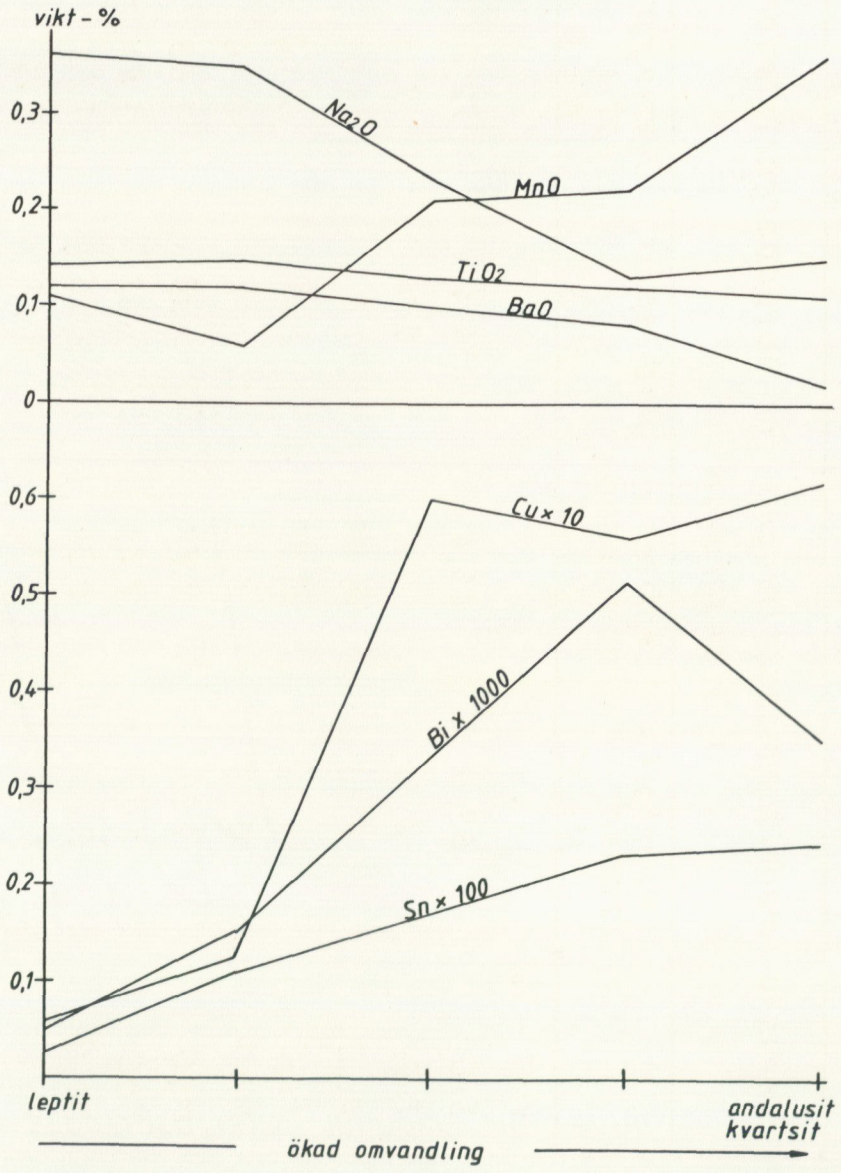


Fig. 6B

Tabell 1.

Kemiska medelsammansättningen för huvudbergartsleden i Gränsgruvan

	Kvartsit-zonen. N = 35	Leptiter i malmzonen. N = 41	Röd leptit N = 8	Överlagrande leptit N = 8
vikt - %				
SiO_2	63,6	65,4	74,4	72,2
TiO_2	0,11	0,16	0,14	0,18
Al_2O_3	8,66	9,99	10,4	13,0
$Fe_2O_{3\,tot}$	14,7	7,90	2,41	2,62
MnO	0,22	0,75	0,11	0,14
MgO	1,29	1,79	0,38	1,68
CaO	1,02	2,73	0,42	1,81
Na_2O	0,20	0,36	0,36	1,23
K_2O	4,30	6,30	8,17	5,72
BaO	0,08	0,08	0,13	0,07
P_2O_5	0,01	0,01	0,02	0,02
S_{tot}	6,66	2,29	1,38	0,34
S_{Fe}	6,30	1,60	0,98	0,33
ppm				
Zn	5876	14550	7356	99
Pb	2955	4284	2226	62
Ag	9	13	6	< 0,3
Cu	611	90	57	18
As	32	121	36	5
Sb	6	23	8	< 5
Bi	7,5	1,5	0,5	< 0,5
Sn	15	8	5	< 2
In	0,9	1,7	< 0,5	< 0,5
Ga	15	13	12	21
Mo	3	3	2	< 2
Ge	1,7	2,2	1,4	1,4

Tabell 2.

Faktoranalys, varimax matrix. Gränsgruvan, 63 prover, sello-transformerade.

91-% av problem variansen

	1	2	3	4	5	6	7
0,9	Cu	$Mg\ Fe_{ox}$	Zn Pb	P			
	S_{Fe}						
0,8			Ag		Na	Ca	
0,7		K Si					Ti
0,6		Mn					
0,5	Al	Ca					
0,4	Ti K Ag		Al			Mn	Al
	Si	Na					K
0,3			Si		Mn Al		
	Na P		Ti Mn			Al	
0,2	Pb		Na Ca	$S_{Fe}Ti$			Na
	+ −	+ −	+ −	+ −	+ −	+ −	+ −
Egen-värde	2,8	3,7	3,0	1,1	1,0	1,0	1,0
	Faktor "scores", medelvärde						
A	1,24	0,31	1,66	0,43	−1,39	−0,31	0,24
B	0,63	−0,13	−0,67	−0,17	0,00	−0,54	−0,48
C	0,12	−0,85	0,28	0,36	0,02	0,76	0,06
D	−0,97	−0,35	0,28	−0,38	0,08	−0,17	−0,86
E	−0,72	−0,13	0,58	−0,39	0,35	0,14	−0,13
F	−0,56	0,94	0,31	0,57	−0,21	0,83	0,59

A: överlagande leptit.
B: leptiter i malmzonen.
C – F: kvartsitzonen, leptit – muskovitleptit – muskovitkvartsit – andalusitkvartsit.

Tabell 3.

Gränsgruvan, faktoranalys, varimax matrix. Kvartsitzonen, 31 prover sello-transformerade.

82,2 % av problem variansen

	1	2	3	4	5
0,9	S_{Fe}	Pb	Mg		Na
	Al Cu				
0,8	Si	Ag		Ti	
	Ca		Fe_{ox}		
0,7				P	
0,6	K	Zn			
			K		
0,5					
	P		Mn		
0,4	Fe_{ox} Ag		Zn		
	Mn		Si		K Mn
0,3					
	Na				
0,2	Ti Zn Mg	Mn Ca	Ca	Fe_{ox}	Si $S_{Fe}Fe_{ox}$
	+ −	+ −	+ −	+ −	+ −
Egenvärde	5,1	2,1	2,5	1,3	1,3
	Faktor "scores", medelvärde				
Leptit	1,34	0,05	0,95	−0,75	0,82
Muskovit Leptit	−0,26	0,27	0,21	0,80	0,24
Muskovit Kvartsit	−0,09	0,06	0,08	0,60	−0,42
Andalusit Kvartsit	0,11	0,04	−1,68	−0,75	0,81

Leptitgeokemin i Bergslagens malmprovins

Björn Lagerblad och Roland Gorbatschev
Avd. f. mineralogi och petrologi
Geologiska institutionen, Lund

Denna sammanställning är avsedd att ge en preliminär överblick över några av de resultat, som hittills erhållits inom det av STU finansierade projektet "Kemisk malmmiljö - Bergslagen". Projektets syfte är, att till hjälp för framtida prospektering fastställa beskaffenheten hos den storskaliga kemiska miljön för bergslagsmalmerna och bland dessa särskilt Bergslagens sulfidmalmer. De resonemang, som här presenteras i korthet kommer att vidareutvecklas och kompletteras i framtida artiklar.

Malmerna uppträder huvudsakligen i den metavulkaniska och sedimentära leptitberggrunden samt dess omvandlingsbergarter. Denna berggrund karakteriseras enligt hittillsvarande föreställningar av en kemisk stratigrafi, som beror på vulkaniternas primära sammansättning, möjligen modifierad genom sedimentär omlagring. Upptill har man en kalietage och nedtill en natriumetage, som motsvaras av specifika variationer i malmernas karaktär.

Beskaffenheten och frekvensen av olika vulkanittyper har dock varit dåligt kända. Föregripande det som redovisas nedan vill vi redan här konstatera att antagandet om en regelbunden primärmagmatisk, stratigrafisk Na-K variation i vulkaniterna visat sig ohållbart. Den kemiska variationens karaktär och fördelning pekar på att alkalistratigrafin är en funktion av temperaturvariationer i hydrotermala konvektionssystem, som givit en överpräglande sekundär kemisk dräkt åt vulkaniterna. Hydrotermala omvandlingar har präglat Bergslagens vulkaniter i en utsträckning som man tidigare inte haft en föreställning om. Trots att de här redovisade proverna tagits från porfyriska vulkaniter som i fält verkat helt friska visade sig ca 40 % vara påtagligt sekundärt omvandlade. Den primärmagmatiska kemin registreras dock fortfarande av SiO_2-halten och, mera grovt, av totalhalterna av de alkalina resp. mafiska elementen. Bäst kan den dock spåras i spårelementhalterna, och då speciellt halterna av de mest svårlösliga och därför orörliga elementen Ti, Zr, Y och Nb. Resultaten av bearbetningen visar ett gemensamt ursprung för alla vulkaniter. Dock finns det vissa regionala variationer.

Provtagningsmetodik

De analyser som använts i denna uppsats kommer från vulkaniter, som inte ligger i anslutning till malmerna eller i deras omvandlingsaureoler. Provtagningen har gjorts så spridd som möjligt för att få en god areell täckning. Förskiffrade bergarter har undvikits, vilket gör att tektoniskt relativt opåverkade områden blivit överrepresenterade. Vulkaniter med tydlig porfyrisk textur har prioriterats. Alla prover som uttagits för analys har undersökts i slip varvid texturerna granskats. Vulkaniterna har i fält och i slip grovklassificerats som lavor, tuffer och vulkaniska sediment. Kalkuppblandade och skarniga vulkaniter har undvikits.

Alla skiktade, skarnuppblandade bergarter utan porfyriska strökorn har betecknats som "vulkaniska sediment". I detta begrepp inkluderas således bl.a. tuffiter, asklager och agglomerat. De mera massiva, porfyriska och oskiktade vulkaniterna har antagits vara lavor och kristalltuffer. Jämna fördelningar av porfyrkornen har tytts som tecken på lavaflöden, medan koncentrationer av megakryster i aggregatform har utgjort en indikation på kristalltuffer.

I de relativt odeformerade och lågmetamorfa områdena, särskilt i Filipstads-Hjulsjöregionen, kan man göra en ytterligare texturell klassificering. Påfallande många kaliumporfyrer har här visat sig vara ignimbriter, dvs. pyroklastiska lavaflöden. I princip har alla skiffriga bergarter undvikits, dock har ett fåtal diskordanta "magnesiametasomatiska" linser provtagits i Hjulsjöområdet. När materialet först bearbetades skildes lavorna och tufferna åt. Denna indelning är dock ofta något vansklig och de två grupperna liknar varandra kemiskt. De har därför behandlats som en enhet i sammanställningarna nedan.

För att undvika skarninblandning, alltför lakade, sulfidimpregnerade eller i övrigt alltför avvikande bergarter har vi i databehandlingen endast medtagit analyser, som har halter av $CaO \leq 3$ vikts%, $Na_2O+K_2O \geq 4$ vikts%, $Pb \leq 100$ ppm, $Zr \leq 400$ ppm, $Y \leq 75$ ppm (vid $SiO_2 \geq 70$ vikts%). Dessa begränsningar har endast eliminerat ett fåtal analyser. Dessa är dock så avvikande att medelvärdena skulle ha påverkats avsevärt om de medtagits.

Porfyrer, som innehåller mer än 70 vikts% SiO_2 har klassificerats som ryoliter medan de som håller mellan 63 och 70 vikts% SiO_2 har klassificerats som ryodaciter (inklusive daciter). Som kriterium på K- eller Na-porfyr har vi krävt att dominansen av den ena alkalimetallen över den andra skall vara större än 5 till 1 i viktsprocent räknat. Alla porfyrer däremellan har betecknats som alkali-intermediära.

Proven har analyserats med protoninducerad röntgenemission (PIXE) på institutionen för kärnfysik i Lund. Metoden beskrives i denna publikation av L.-E. Karlsson. För kontrollens skull har 150 lava-porfyrer även analyserats medelst röntgenfluorescens av Ingrid Johansson och Z. Solyom på geologiska institutionens geokemiska laboratorium i Lund. Jämförelsen har givit ett tillfredsställande resultat. När halterna av vissa element legat under detektionsgränsen har de tilldelats följande fiktiva värden: MgO:0.2 vikts%, MnO:0.003 vikts%, Zn:3 ppm, Pb:3 ppm.

Kemisk variation bland Bergslagens vulkaniter

Regionala iakttagelser

Största arean i den undersökta delen av Bergslagen upptas av ryolitiska vulkaniter. De ryodacitiska (och dacitiska) vulkaniterna uppträder huvudsakligen inom areellt begränsade områden eller bildar komplex, men det finnes dessutom smärre förekomster av ryodacit på andra ställen. Filipstads-Hjulsjöregionen är huvudsakligen ryolitisk, medan ryodaciter och daciter är vanliga exempelvis i Garpenbergsområdet.

Såväl Na- som K-porfyrerna uppbygger ofta väldefinierade områden. Na-porfyrerna förekommer gärna i komplex med stor sammanhängande areell utbredning. K-porfyrerna däremot uppträder främst i lagerpackar i anslutning till sediment. Båda bergartstyperna bildar dessutom begränsade partier i områden, som för övrigt domineras av alkaliintermediära vulkaniter. Na- och K-porfyrer förekommer inom såväl ryolit- som ryodacitdominerade områden. De har då SiO_2-halter som liknar dem i intilliggande alkaliintermediära bergarter. De alkaliextrema porfyrerna är dock vanligast i ryolitdominerade områden. Ryodaciterna verkar generellt vara mindre påverkade av de sekundära kemiska processer som har lett till extrem alkalispecialisering.

Regional variation av leptiternas primära geokemi

Det har påvisats tidigare (jfr. t.ex. Frietsch), att Bergslagens vulkaniter har sammansättningar, som ofta inte överensstämmer med normala magmatiska differentiationstrender. Även de flesta porfyriska leptiterna har uppenbarligen påverkats av sekundära omvandlingsprocesser. Trots detta visar de inbördes relationerna mellan viktiga beståndsdelar (t.ex. Σalk, $CaO+K_2O+Na_2O$, Fe_2O_3+MgO, Al_2O_3 och SiO_2 m.fl.) delvis normal magmatisk variation (jfr. diagr.1b). Man måste dock göra den reservationen att SiO_2-anrikningen stundom är extrem.

För att få en uppfattning om de primära sammansättningarna och beskriva deras variation i starkt omvandlade bergarter kan det vara fördelaktigt att använda sig av kemiska element som är stabila, dvs. föga benägna att röra på sig vid metamorfos. Ti, Zr, Y och Nb tillhör denna orörliga elementgrupp. De har tidigare använts framför allt för att undersöka och klassificera basiska bergarter. Det har visat sig empiriskt, att särskilt kvoterna men även de absoluta halterna karakteriserar olika magmatiska system (se t.ex. Pearce och Cann 1973, Winchester och Floyd 1977).

Primärmagmatiska trender och eventuella regionala olikheter kan studeras bl.a. om man avsätter SiO_2 halterna mot förhållandet Zr/Y (Fig. 1a, jfr. Floyd och Winchester 1977) Zr anrikas i de sura differentiaten medan Ti fixeras i de mera basiska bergarterna. Diagram 1a omfattar såväl porfyriska leptiter som effusiva metabasiter. De i förhållande till Mg-halterna järnfattigaste bergarterna ($Fe_2O_3/Fe_2O_3+MgO \leq 0,3$) har dock uteslutits då det visat sig att urlakning av Fe vid "magnesiametasomatos" även åtföljs av Ti-lakning (fig. diagr. 4). Detta diagram visar, att Bergslagens vulkaniter tillhör en enda huvudsaklig differentiationstrend men har en bimodal frekvensfördelning med en relativ brist på andesiter och daciter (jfr. även van der Velden m.fl. 1982 för Grythytteområdet där det även saknas ryodaciter).

För att utröna förhållandet mellan alkaliextrema sura porfyriska leptiter och motsvarande alkaliintermediära bergarter, har vi jämfört deras halter och kvoter av orörliga element (diagr. 2). Det visar sig, att alkalivariationen inte är direkt kopplad till fördelningen eller halterna av de orörliga elementen. Detta måste ses som en indikation på ett gemensamt ursprung och en primär sammansättningsmässig likhet mellan de två bergartsgrupperna.

Normala, sura ryoliter bör även ha högre halter av Fe än Mg. Det omvända tyder på sekundär omvandling. Diagr. 2c upptar alla sura porfyrer med Mg>Fe i viktsprocent. I jämförelse med ryoliter där Fe-halterna är högre än Mg-halterna finner vi en större spridning av punkterna, men den allmänna trenden ligger kvar. Detta bekräftar, att de "orörliga" elementen verkligen i stort sätt är stabila i de porfyriska leptiterna.

Trots att kvoterna av de orörliga elementen är tillnärmelsevis lika i hela den undersökta delen av Bergslagen finnes vissa regionala variationer av halterna. En närmare analys av denna och andra olikheter ryms inte här men det är angeläget att påpeka, att den södra delregionen skiljer sig något från den norra (diagr. 3, tab. 2, jmfr. kartan fig. 1). Ljusnarsbergs-, Riddarhytte- och Norbergsområdena intar en övergångsställning och är därför ej medtagna i sammanställningen.

Skillnaderna i halten av de orörliga elementen mellan områdena i norr och söder märks framför allt hos de ryolitiska porfyrerna. Motsvarande

variation inte kan spåras hos ryodaciterna.

Generellt kan sägas att skillnader i halterna av de orörliga elementen återspeglar kristallisationssekvensen i smältan medan kvoterna i högre grad indikerar ursprung och miljö (Pearce och Norry 1979). Med utgångspunkt från kvoterna finner vi att bergslagsvulkaniterna utgör en genetiskt homogen grupp. Variationen i halterna måste förklaras av kristallisationssekvensen. Skillnaderna speciellt mellan Garpenbergs och Filipstads-Hjulsjö-regionerna motsvaras av olika frekvenser av daciter och ryodaciter, vilket även detta kan återspegla olikheter i magmautvecklingen. De norra leptitområdena har generellt något högre halter av Mn, Pb och Zn än de södra. Denna trend spåras i alla alkaliintermediära vulkaniter (Tab. 2) och synes därför vara oberoende av sekundära omvandlingsprocesser. Olikheterna är av intresse då de flesta stora sulfidmalmerna finns i de norra områdena. Cu-halterna har inte kunnat analyseras med den hittills använda metodiken men kommer att undersökas under det fortsatta projektarbetet.

Sekundära kemiska förändringar

De sekundära kemiska förändringar, som präglar stora delar av Bergslagens porfyriska leptiter, återspeglas mest påtagligt i alkaliproportionerna och förhållandet mellan Fe och Mg. Den typ av extrem alkalispecialisering som kännetecknar många leptiter kan inte åstadkommas i stora bergartsvolymer genom magmatisk utveckling i kalkalkalina smältor. Vid normal magmatisk differentiation stiger dessutom Fe/Mg-kvoterna med SiO_2-halten medan en diametralt motsatt trend kännetecknar de ryolitiska porfyrerna i Bergslagen. Den iakttagna kemiska variationen kan heller inte förklaras genom förändringar vid vittring och sedimentär omlagring.

Förändringarna av alkaliproportionerna och Fe/Mg-förhållandet går ofta hand i hand, men vi kan likväl spåra två huvudsakliga processtyper. Alkalispecialiseringen har regional utbredning och åtföljs även av förändringar av Fe/Mg-kvoterna, men extrem Mg-anrikning är gärna bunden till mera begränsade delområden och permeabilitetsstråk. K-leptiterna tenderar på det hela taget att förekomma på stratigrafiskt högre nivåer än Na-leptiterna, men mera komplicerade rumsliga relationer kan iakttas stundom. Medelsammansättningarna av porfyriska ryolitiska leptiter med olika alkalispecialisering visas i tabell 1.

De regionala K- och Na-anrikningarna kan vid första påseendet synas vara komplementära processer. En närmare analys av de data, som sammanställts i tabell 1 och diagram 4 och 5 visar dock att så inte helt är fallet. Ryolitiska kalileptiter kännetecknas av en anrikning av K samt Rb och Ba som har ett geokemiskt sett likartat beteende. De utarmas i förhållande till de alkaliintermediära ryoliterna på Na och i andra hand

Ca och Sr, men halterna av de flesta övriga elementen är likartade i de två leptitgrupperna (tab. 1 och diagr. 5).

Na-leptiterna visar däremot med stigande alkalispecialisering en minskning av halterna av K, Ba, Rb, Fe, Mn, Ti, Pb och Zr. Halterna av Ca, Sr och Mg minskar svagt eller förblir oförändrade utom vid extrem Na-specialisering, men Mg/Fe-proportionerna ökar på grund av sjunkande Fe. SiO_2 ökar något i jämförelse med alkaliintermediära leptiter men denna ökning beror i stort sett på förlusten av de flesta övriga kemiska elementen. Halterna av Al, Y, Zr, Nb och Th i K- och Na- leptiterna är desamma som i alkaliintermediära leptiter.

Sammanfattningsvis ser vi således att Na-leptiterna utarmas på alla huvudelement utom Na, Si och Mg. Med undantag av K, Ba och Rb anrikas de "förlorade" elementen emellertid inte i K-leptiternas huvudmassa men väl till en del i de malmer och karbonatbergarter, som associerar med K-leptiterna. En viktig företeelse i Bergslagen är den kemiska variation, som åtföljer Fe/Mg-kvoternas förändring i leptiterna. För att kunna isolera denna effekt från den normalmagmatiska variationen i serien dacit-ryodacit-ryolit betraktas i diagram 4 och 5 endast ryolitiska porfyriska leptiter med SiO_2>70 vikts %. Vi finner då, att den relativa och absoluta anrikningen på Mg går hand i hand med leptiternas Na-specialisering. Den karakteriseras av en renodling av den i Na-leptiterna iakttagna kemiska variationen och uppträder framför allt vid den extrema Na-anrikning, som kännetecknar en mindre men inte areellt skarpt avgränsad del av leptitberggrunden. I dessa fall sker en aktiv anrikning på Mg.

Den Mg-anrikningsprocess som åtföljer Na-anrikningen har påtagliga kemiska likheter med den "magnesiametasomatos", som sker i begränsade, oftast tektoniskt kontrollerade stråk i berggrunden. De två omvandlingstyperna skiljer sig dock genom att den areellt begränsade magnesiametasomatosen även medför en nästan total förlust av Na, ett fullständigt försvinnande av fältspater och en fixering av K och Rb i glimmer. En övergångsställning synes intas av de fyra analyserade leptiterna, som har Fe_2O_3/Fe_2O_3+MgO kvoter mellan 0,1 och 0,2 (diagr. 3).

Sammanfattningsvis finner vi att Na- och K-specialiseringen av leptiterna är en regional metasomatisk process som inte kan förklaras genom magmatiska eller sedimentära differentiationsmekanismer. Na-leptiternas bildning medför en storskalig urlakning av berggrunden på alla analyserade element utom Na, Mg, Si, Y, Nb, Ga, Th och ofta Al. K-specialiseringen drabbar huvudsakligen fältspaterna och innebär inte samma drastiska förändring av den kemiska totalbilden. Na-anrikningen åtföljs i sina långt gångna stadier även av aktiv Mg-anrikning, som ansluter till

den "magnesiametasomatos" som uppträder i tektoniska zoner, malmaureloer och andra välavgränsade områden.

Den totala omvandlingsbilden i leptiterna indikerar, att de kemiska förändringarna orsakas av hydrotermala/pneumatolytiska cirkulationssystem. Den drivande mekanismen i sådana system är den konvektion, som orsakas av värmekontrasten mellan den vulkaniskt aktiva berggrunden och kallare marint eller meteoriskt vatten. Den roll som Mg och Na spelar i Bergslagens omvandlingsregion pekar klart på havsvattnets betydelse.

Utbyte med ytnära, relativt svalt (< ca 140°C) marint vatten leder enligt experimentella och empiriska resultat (Bloch och Bischoff 1979, Fournier och Truesdell 1973, Munhá m.fl. 1980, osv.) till K-fixering i silikatbergarter medan mera högtempererade lösningar kan orsaka Na-metasomatos (Arnarsson 1978, Mottl och Holland 1978, Hajash och Chandler 1981, m.fl.), Mg-anrikning och urlakning av en lång rad malmelement som avsätts på högre nivåer eller vid lösningarnas utträde (Mac Geehan 1977, Barnes 1979, Weissberg m.fl. 1979). Kalifixeringen i ryoliter är i stor utsträckning en funktion av devitrifiering och hydrering av vulkaniskt glas (Steward 1979), vilket stämmer väl med K-ryoliternas texturer i Bergslagen.

Fördelningen av de olika typerna av omvandlingsbergarter i Bergslagen tyder på, att Na- och K-leptiterna bildades genom kemiskt utbyte med perkolerande, delvis nedåtgående strömmar av marint vatten, som genomsaftade vulkanitberggrundens hela massa och därvid orsakade omfattande lakning av bl.a. malmelement ur Na-leptiterna. De egentliga magnesiametasomatiternas uppträdande visar däremot att de följer transportkanaler för uppåtgående lösningar som ansamlats ur den Na-omvandlade leptitberggrunden.
gående lösningar som ansamlats ur den Na-omvandlade leptitberggrunden.

Det kan slutligen noteras, att K- och Na-extrema ryoliter numera blivit kända från många vulkaniska bergartskomplex av vitt skilda åldrar. Dessa komplex är påfallande ofta rika på malmer.

De sekundära omvandlingarnas betydelse för malmbildning och prospektering

De geokemiska studier, som på senare tid utförts i Bergslagen pekar klart på att till vulkanismen knutna hydrotermala processer hade stor betydelse för malmernas bildning och berggrundens nuvarande beskaffenhet. Dessa processer har under det senaste decenniet även intagit en central plats i den internationella diskussionen (se t.ex. den av H.J. Barnes redigerade boken "Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits", 1979).

Man vet av erfarenhet, att Bergslagens Cu-, Zn- och Pb-malmer gärna ligger i anslutning till kvartsitiska, glimmerrika, magnesiametasomatiskt omvandlade bergarter i s.k. malmaureoler. Påfallande ofta uppträder de

också i anslutning till inlagringar av detritala eller karbonatiska och skarniga sediment i leptitberggrunden. Detta tyder på exhalativa malmbildningsprocesser.

Det ansågs länge, att de lösningar, som förorsakat malmbildningen och "magnesiametasomatosen" var restlösningar från graniter, som till stor del är senare än vulkaniterna. Denna uppfattning, som först på allvar ifrågasättes av Koark (1962), har nu visat sig vara helt ohållbar. De här aktuella malmerna associerar regionalt sett inte med graniter utan med vulkaniter och bland dessa särskilt med vulkaniter, som undergått de omvandlingar som beskrivs i föreliggande rapport. Man kan även med radiometriska metoder och i fält visa, att den med malmerna associerade skarnbildningen är tidig och i stort syngenetisk med vulkaniternas uppkomst (t.ex. Moorman m.fl. 1982).

Vår nuvarande studie gör det sannolikt att mycket stora mängder Pb och Zn (Cu har ännu inte analyserats) har urlakats ur de enorma vulkanitvolymer, som undergått mer eller mindre genomgripande Na-omvandling. Det ligger därför nära till hands, att se ett samband mellan de sekundära kemiska omvandlingarna i leptitberggrunden och malmernas bildning. Detta innebär, att de mycket stora, av Na-leptiter upptagna terrängerna är föga intressanta för prospektering efter Pb-, Zn- och Cu-malmer. De låg på relativt stora djup under den malmbildande processen och utarmades på malmbildande element.

K-leptiterna däremot är viktiga ur prospekteringssynpunkt men inte därför att de i sig är rika på malmelement eller primärmagmatiskt associerar med malmer, utan därför att K-omvandlingen skedde på höga stratigrafiska nivåer där sulfidelementen och Mn i stort sett samtidigt utfälldes genom exhalativa eller ytnära hydrotermala processer. Exhalativmalmernas vanlighet gör, att sedimentlager och skiktade vulkaniter i K-leptiterna tilldrar sig ett särskilt intresse. Enligt samma resonemang bör större alkaliintermediära leptitområden vara mindre intressanta än K-leptiterna. De delvis på sulfidmalmselement anrikade hydrotermala lösningarnas väg mot jordytan och deras utträdesställen markeras sannolikt av de diskordanta och konkordanta magnesiametasomatiskt omvandlade områdena. Dessa stråk kännetecknas av de viktigaste sulfidmalmerna. De tilldrar sig därför ett mycket stort intresse ur malmgenetisk och på sikt också prospekteringsteknisk synpunkt men kommer att behandlas utförligare först under projektets fortsatta löptid.

Referenser:

Arnarsson, S.: Major element chemistry of the geothermal sea-water at Reykjanes and Svartsengi, Iceland. Min. Mag., 1978, vol. 42, sid. 209-220.

Barnes, H.J. (red.): Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 1979, John Wiley and Sons. 2 upplagan.

Barnes, H.J.: Solubilities of ore minerals. I "Barnesboken" ovan.

Bloch, S. och Bischoff, J.: The effects of low-temperature alteration of basalts on the ocean budget of potassium. Geology, 1979, nr. 7, sid. 193-196.

Floyd, P.A. och Winchester, J.A.: Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements. Chemical Geology, 1977, vol. 21, sid. 291-306.

Fournier, R.O. och Truesdell, A.H.: An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. Geochim. Cosmochim. Acta, 1973, vol. 37, sid. 1255-1275.

Hajash, A. och Chandler, G.W.: An experimental investigation of high-temperature interaction between seawater and ryolite, andesite, basalt and peridotite. Cont. Min. and Petr., 1981, vol. 78, nr. 3, sid. 240-255.

Koark, H.J.: Zur Altersstellung und Entstehung der Sulfiderze vom Typus Falun. Geol. Rundschau, 1982, vol. 52, 123-145.

MacGeehan, P.J.: The geochemistry of altered volcanic rocks at Matagami, Quebec: A geothermal model for massive sulphide genesis. Can. J. Earth, Sci., 1978, vol. 15, sid. 551-570.

Magnusson, N.H.: Malm i Sverige, del 1: Mellersta och södra Sverige, 1973. Almqvist och Wiksell.

Moorman, A.C., Andriessen, P.A.M., m. fl.: K-Ar and Rb-Sr mineral ages of skarns and associated metabasites and leptites in the Hjulsjö area of the Bergslagen ore province, central Sweden, 1982. GFF, vol. 104, del 1, sid. 1-11.

Mottl, M.J. och Holland, H.D.: Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalts by seawater. Experimental results for major and minor components of seawater. Geochim. Cosmochim. Acta, 1978, vol. 42, sid. 1103-1115.

Munhá, J., Fyte, W.S. och Kerrich, R.: Adularia, the characteristic mineral of felsic spilites. Cont. Min. and Petr., 1980, vol. 75, sid. 15-19.

Pearce, J.A. och Cann, J.R.: Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. Earth Planet. Sci. Lett., 1973, vol. 19, sid. 290-300.

Pearce, J.A. och Norry, M.J.: Petrogenetic implication of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. Cont. Min. och Petr., 1979, vol. 69, sid. 33-47.

Steward, D.B.: The formation of siliceous potassic glassy rocks, I boken "The evolution of the igneous rocks" (red. Yoder, H.S.), 1979. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, sid. 339-351.

Velden, J.W. van der, Baker, J.H., Maesschalk, A.A. de och Meerten, Th.G. van: Bimodal early Proterozoic volcanism in the Grythytte Field and associated volcano-plutonic complexes, Bergslagen, central Sweden. Geol. Rundschau, 1982, Band 71, sid. 171-181.

Weisberg, B.G., Browne, P.R.L. och Seward, T.M.: Ore metals in active geothermal systems. I "Barnesboken" ovan.

Winchester, J.A. och Floyd, P.A.: Geochemical magma type discrimination. Earth Planet. Sci. Lett., 1976, vol. 28, sid. 459-469.

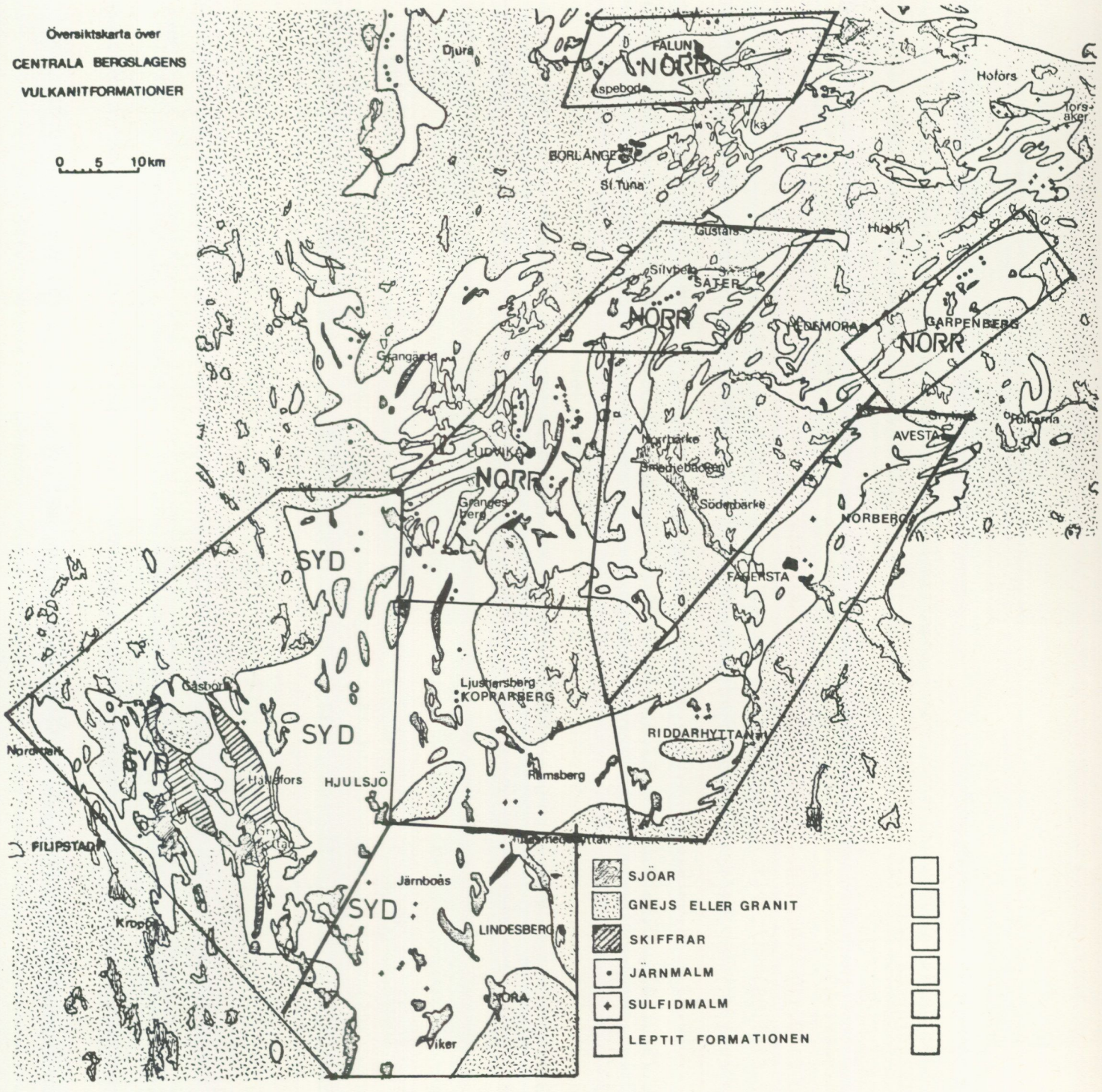


Fig. 1. Karta som visar de provtagna områdena i Bergslagen. De områden som är markerade med Syd respektive Norr är de från vilka analyserna i tabell 2 och diagram 3 är utvalda. Kartan är modifierad från Magnusson 1973.

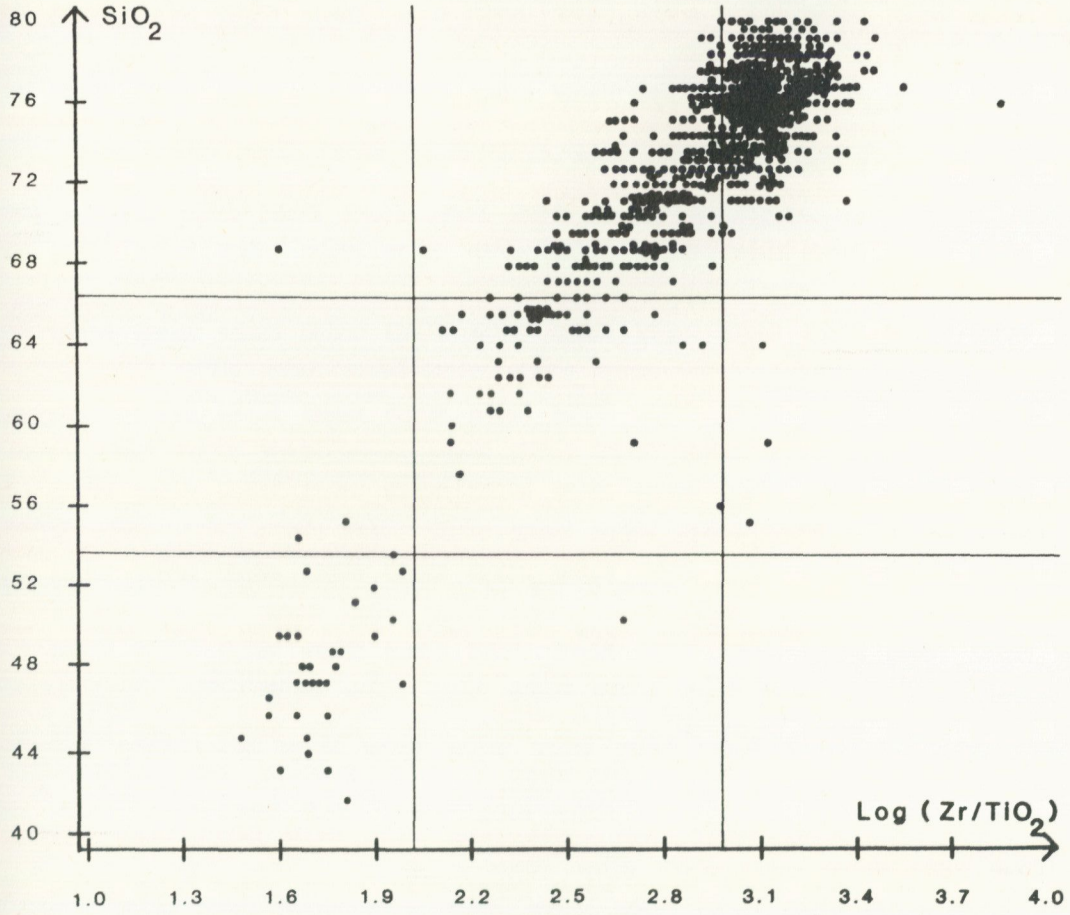
	← Ryoliter →				← Ryodaciter daciter →			
	Samtliga	Alk-intermed.	K-porfyr	Na-porfyr	Alk-intermed.	K-porfyr	Na-porfyr	Mg-metasomatiter
Antal	553	333	95	125	90	14	10	15
SiO_2(vikts%)	75.43(2.62)	74.94(2.50)	74.68(2.25)	77.28(2.35)	67.60(1.86)	67.70(1.85)	66.85(1.98)	76.92(1.47)
TiO_2	0.19(0.11)	0.21(0.11)	0.21(0.11)	0.16(0.08)	0.56(0.24)	0.42(0.17)	0.58(0.20)	0.14(0.07)
Al_2O_3	12.46(1.12)	12.61(1.06)	12.32(1.26)	12.18(1.10)	14.50(0.99)	15.02(0.85)	14.86(2.14)	12.12(0.96)
Fe_2O_3	2.16(1.22)	2.40(1.16)	2.54(1.15)	1.24(0.95)	4.70(1.45)	3.92(1.16)	4.60(1.93)	0.65(0.37)
MnO	0.03(0.03)	0.03(0.03)	0.04(0.04)	0.01(0.01)	0.06(0.04)	0.06(0.03)	0.04(0.03)	0.01(0.01)
CaO	0.71(0.71)	0.79(0.64)	0.55(0.66)	0.63(0.63)	2.04(0.94)	0.94(0.52)	1.80(1.12)	0.14(0.16)
MgO	0.89(0.68)	0.93(0.66)	0.88(0.67)	0.79(0.72)	1.67(0.90)	1.19(0.63)	2.02(1.16)	4.27(0.95)
Na_2O	3.45(1.94)	3.33(1.10)	0.59(0.36)	5.94(0.88)	3.60(1.11)	0.75(0.35)	6.30(1.07)	0.81(0.85)
K_2O	3.53(2.50)	3.62(1.50)	7.26(1.44)	0.47(0.28)	3.33(1.43)	8.90(1.17)	0.56(0.42)	3.07(0.88)
Fe_2O_3+MgO	3.04(1.59)	3.32(1.53	3.42(1.43)	2.03(1.41)	6.37(1.91)	5.11(1.39)	6.62(2.36)	4.93(0.85)
Zn (ppm)	16 (18)	19 (19)	15 (17)	8 (8)	30 (22)	22 (20)	20 (12)	6 (4)
Ga	17 (3)	18 (3)	17 (3)	17 (3)	19 (2)	19 (3)	19 (4)	17 (4)
Rb	86 (60)	89 (44)	164 (45)	17 (14)	108 (43)	226 (48)	24 (18)	88 (33)
Sr	44 (42)	51 (43)	27 (21)	41 (44)	117 (87)	46 (29)	96 (88)	9 (10)
Y	38 (13)	38 (13)	37 (13)	38 (13)	29 (9)	29 (14)	33 (14)	41 (17)
Zr	204 (66)	203 (67)	221 (71)	196 (57)	207 (72)	213 (46)	217 (75)	148 (49)
Nb	14 (4)	13 (4)	15 (4)	14 (4)	11 (4)	12 (4)	11 (5)	15 (5)
Ba	731 (584)	850 (528)	1125 (544)	115 (97)	638 (372)	1174 (305)	143 (149)	247 (196)
Th	15 (4)	15 (3)	16 (3)	15 (4)	11 (4)	12 (4)	13 (5)	16 (4)
Pb	8 (7)	9 (8)	9 (7)	5 (4)	7 (8)	13 (10)	3 (0)	4 (2)

Tabell 1. Ryolitiska och ryodacitiska porfyriska leptiter selekterade med avseende på alkaliproportionerna samt analyser från diskordanta Mg-metasomatiska zoner i Hjulsjöområdet. Standardavvikelsen på medelvärdet inom parentes. Allt järn beräknat som Fe_2O_3.

	Norr	Syd	Garpenberg	Säter	Riddarhyttan Norberg	Filipstad Hjulsjö
Antal:	103	132	18	35	41	96
SiO_2(vikts%)	74.28(2.56)	75.44(2.25)	75.30(2.61)	74.97(2.21)	74.72(2.50)	75.89(1.94)
TiO_2	0.22(0.12)	0.19(0.10)	0.21(0.14)	0.18(0.08)	0.21(0.10)	0.17(0.07)
Al_2O_3	13.04(1.03)	12.28(1.02)	12.83(1.26)	12.82(0.89)	12.64(1.15)	12.08(0.87)
Fe_2O_3	2.73(1.31)	2.12(0.99)	2.23(0.90)	2.07(1.05)	2.53(1.05)	1.98(0.94)
MnO	0.05(0.03)	0.02(0.03)	0.04(0.03)	0.05(0.03)	0.03(0.02)	0.02(0.04)
CaO	0.92(0.61)	0.60(0.58)	0.86(0.59)	0.95(0.67)	0.82(0.62)	0.43(0.39)
MgO	0.79(0.48)	1.06(0.78)	0.86(0.52)	0.67(0.49)	1.13(0.64)	0.95(0.75)
Na_2O	3.63(0.92)	3.28(1.09)	3.10(0.84)	3.71(0.87)	2.94(1.26)	3.41(1.06)
K_2O	3.29(1.47)	3.60(1.51)	3.53(1.31)	3.34(1.55)	3.96(1.66)	3.58(1.59)
Fe_2O_3+MgO	3.51(1.63)	3.19(1.53)	3.09(1.29)	2.74(1.39)	3.66(1.41)	2.93(1.41)

Zn (ppm)	30	(22)	12	(15)	30	(18)	33	(25)	14	(12)	13	(15)
Ga	17	(3)	18	(3)	16	(2)	16	(3)	18	(2)	18	(3)
Rb	77	(34)	83	(43)	90	(35)	76	(31)	109	(48)	70	(34)
Sr	63	(46)	41	(42)	96	(57)	63	(28)	59	(48)	33	(23)
Y	30	(10)	42	(14)	22	(7)	28	(9)	34	(10)	44	(13)
Zr	174	(44)	223	(66)	139	(30)	161	(42)	171	(58)	223	(64)
Nb	11	(3)	15	(5)	9	(3)	10	(3)	14	(5)	16	(5)
Ba	964	(577)	772	(482)	1015	(492)	1198	(748)	684	(417)	837	(488)
Th	15	(3)	15	(4)	13	(3)	15	(3)	16	(3)	16	(4)
Pb	13	(10)	6	(6)	14	(10)	16	(9)	6	(3)	6	(5)

Tabell 2. Områdesvis selekterade (se Fig. 1) ryolitiska alkaliintermediära porfyrer. Standardavvikelsen på medelvärdet inom parentes. Allt järn beräknat som Fe_2O_3.



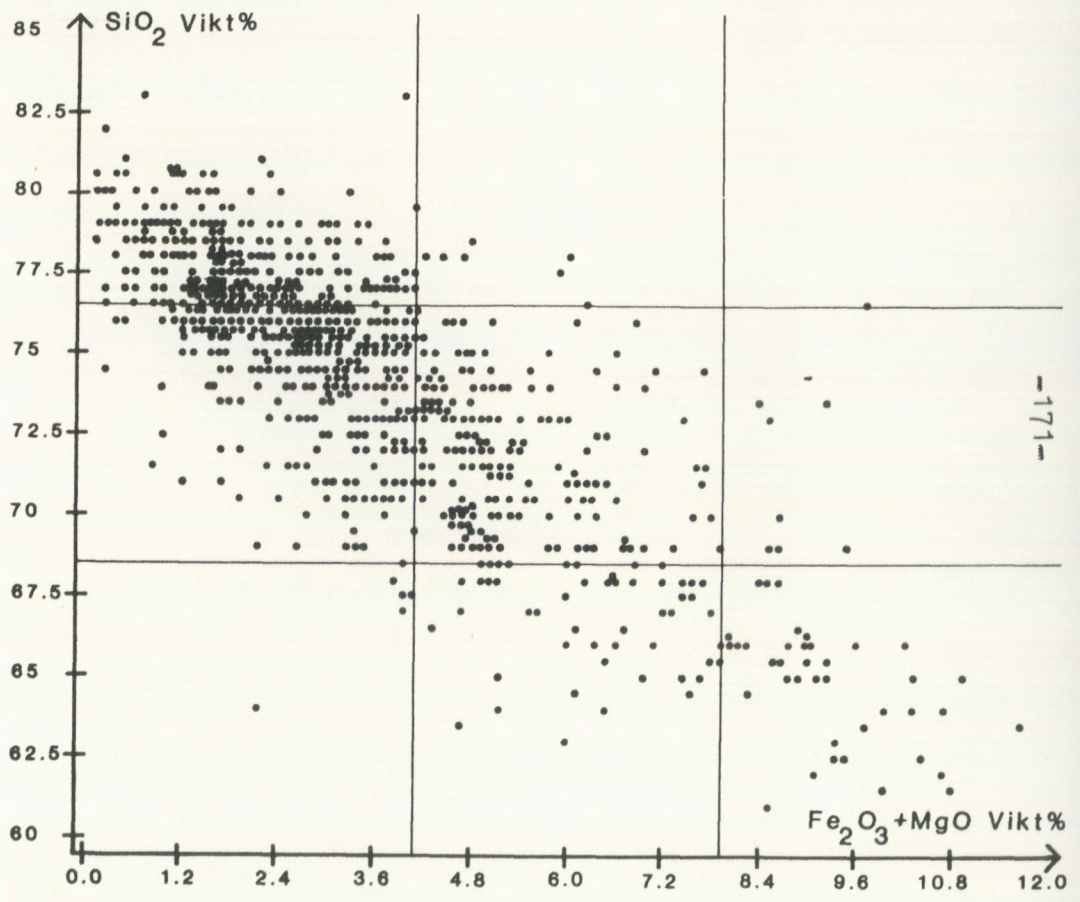


Diagram 1: A. SiO_2-Zr/TiO_2 diagram som visar en primärmagmatisk trend för alla porfyriska leptiter samt de effusiva basiterna. B. Diagram som visar hur Fe_2O_3+MgO summan varierar med SiO_2 halterna hos de porfyriska leptiterna.

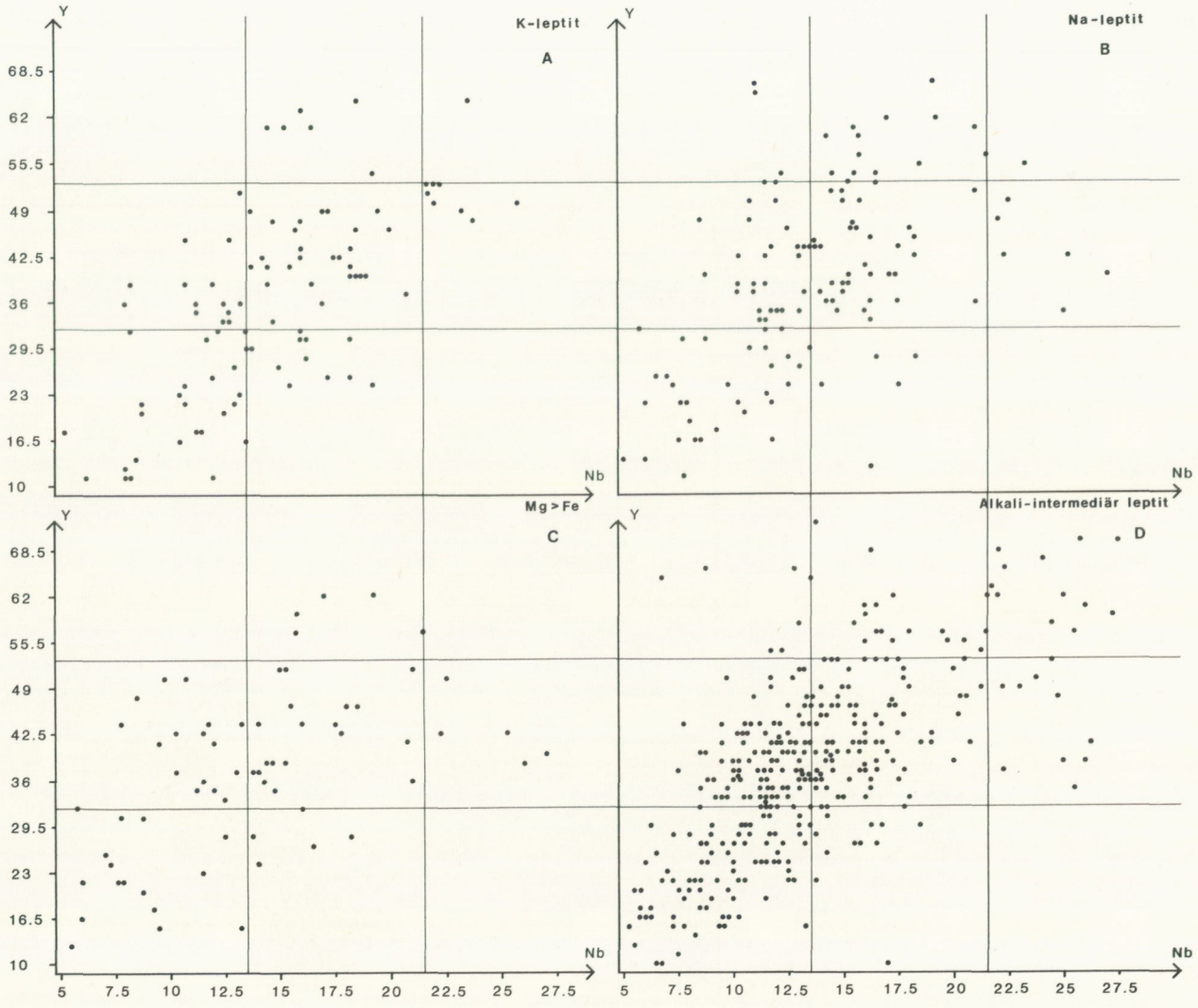


Diagram 2. Y-Nb diagram, som antyder ett gemensamt ursprung för omvandlade och sekundärt omvandlade (Mg>Fe; K-leptiter samt Na-leptiter) sura ($SiO_2 \geq 70$ vikts%) porfyriska leptiter.

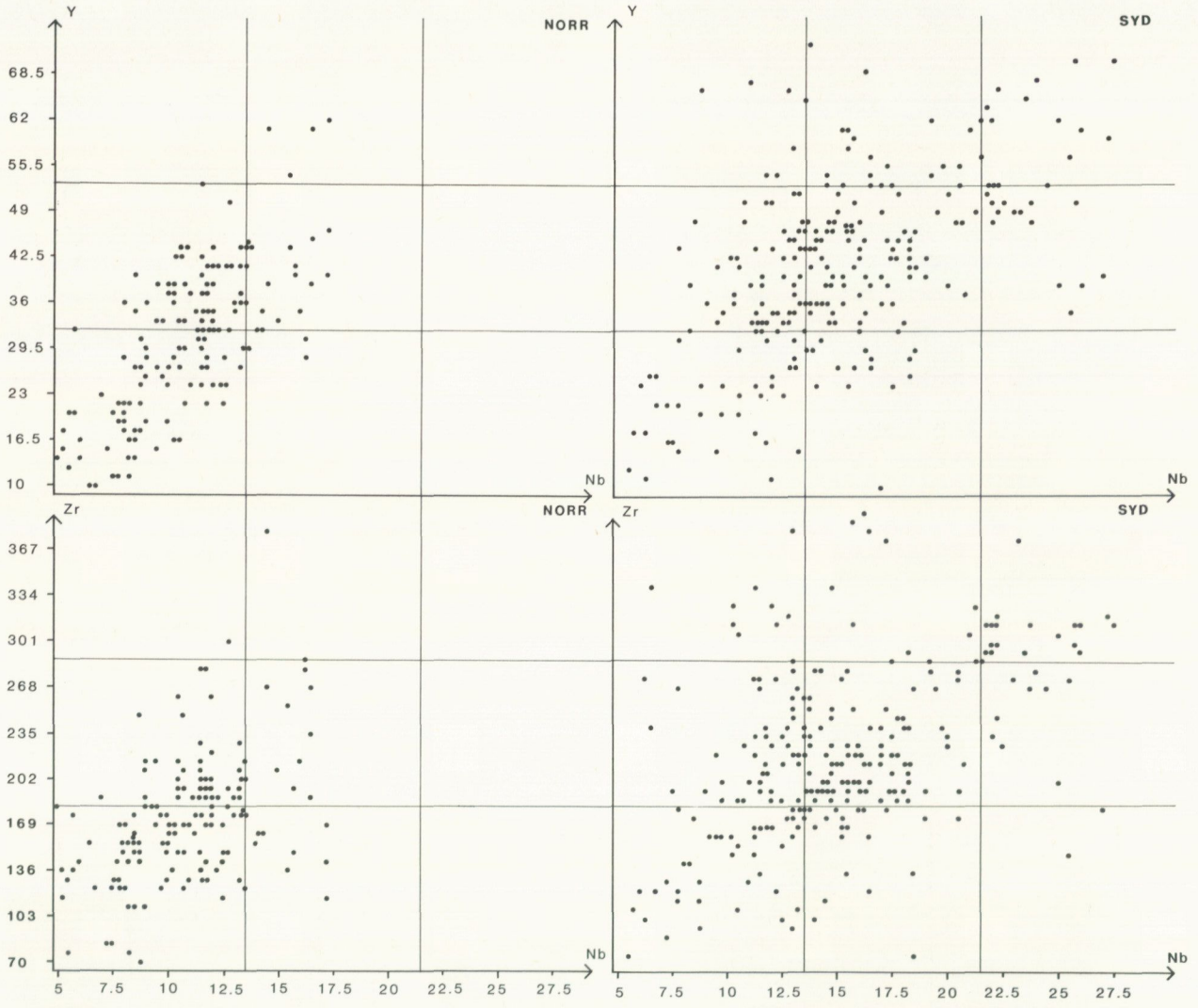


Diagram 3. Y-Nb och Y-Zr diagram som visar skillnaden i halterna av dessa "orörliga element" mellan de områden som betecknats Syd resp. Norr i Fig. 1. Endast sura porfyrer ($SiO_2 \geq 70$ vikts%) är medtagna.

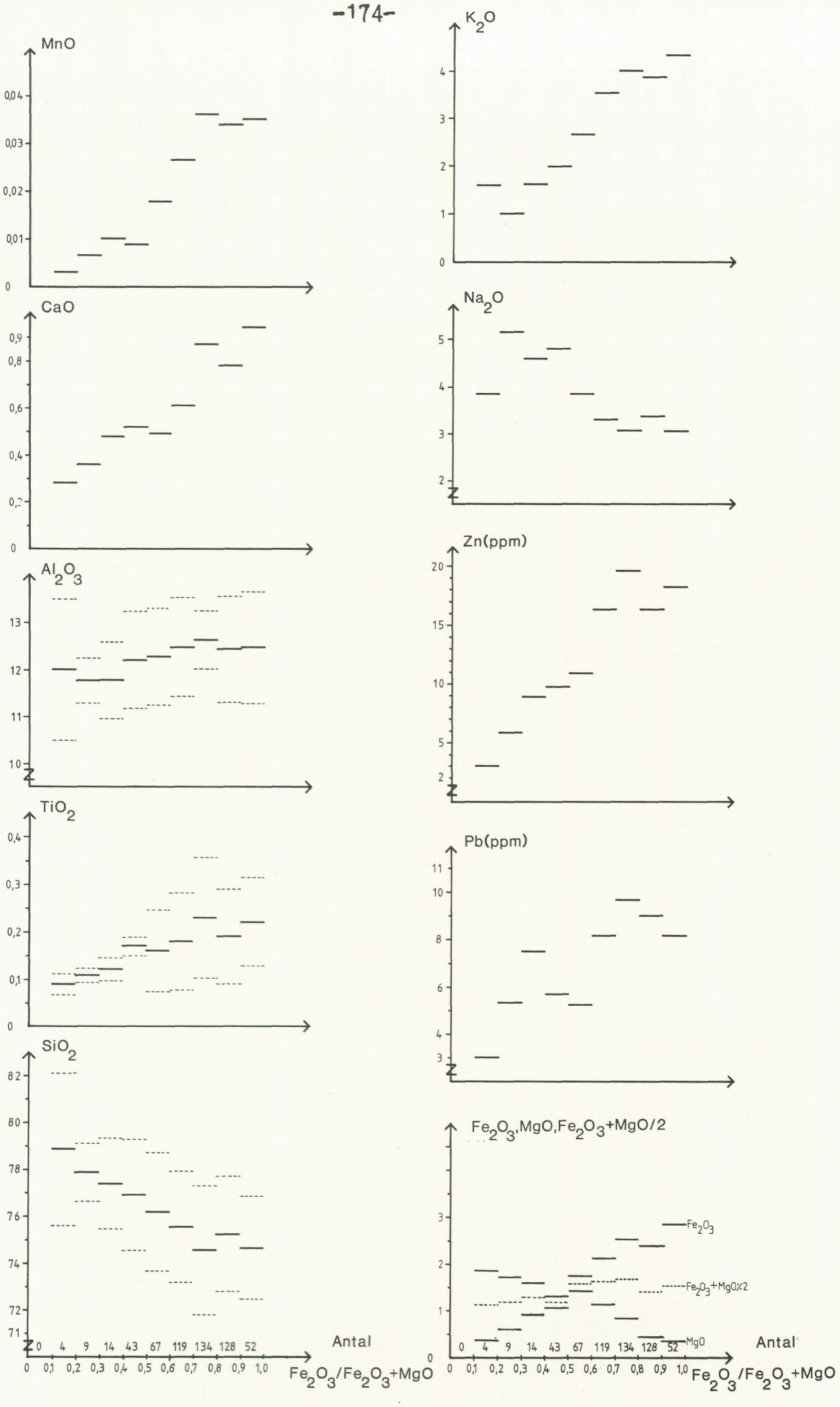


Diagram 4. Fe-Mg proportionernas relation till vissa elementhalter i sura ($SiO_2 \geq 70$ vikts%) porfyriska leptiter. De lätt streckade linjerna för Si, Ti och Al visar standardavvikelserna på medelvärdena inom resp. haltintervall.

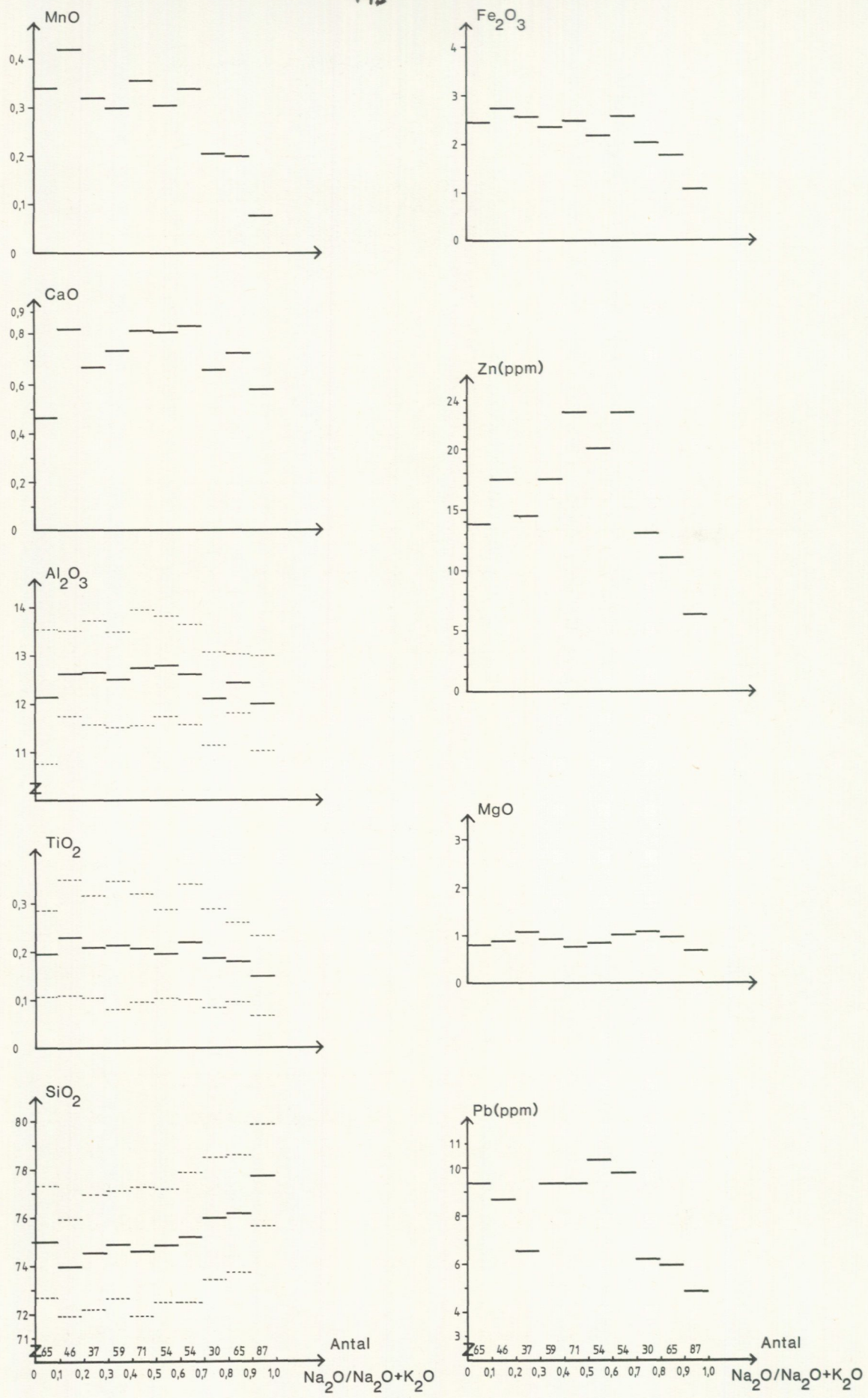


Diagram 5. Na-K proportionernas relation till vissa elementhalter i sura ($SiO_2 \geq 70$ vikts%) porfyriska leptiter. De lätt streckade linjerna för Si, Ti och Al visar standardavvikelserna på medelvärdena inom resp. haltintervall.

STU:s INSATSOMRÅDE TEKNIKUTVECKLING FÖR DJUPPROSPEKTERING

Staffan Hjorth
Styrelsen för teknisk utveckling, STU
Box 43200, 100 72 STOCKHOLM

STUs insatsområde Djupprospektering är en nyligen inledd satsning med syfte att stimulera och stödja utveckling av teknik för prospektering efter djupmalmer. En beskrivning av insatsområdet finns i STUs broschyr, Teknikutveckling för Djupprospektering, som kan rekvireras från STU.

En gemensam nämnare för insatsområdet och det här symposiet är inriktningen på metodik och teknik för praktisk prospektering. STUs satsning gäller målinriktat utvecklingsarbete och har en fastställd tidsram på 5 år och en kostnadsram på 19 Mkr.

Insatsområdets mål är att: Utveckla och utprova tekniska system för att möjliggöra djupprospektering efter främst sulfidmalmer i våra traditionella gruvdistrikt. Att utprova står här för strävan att verkligen nå fram till en utvärdering av projekten ur praktisk prospekteringssynvinkel. Denna utprovning och utvärdering bör av flera skäl så långt möjligt ske i anslutning till pågående prospektering. Ett skäl är naturligtvis kostnaderna, som för t ex utprovning av en ny borrningsteknik för djupa borrhål kan bli mycket stora. Från STUs sida räknar vi med att frågan om finansiering av sådana fältförsök och utprovningar på detta sätt skall kunna lösas genom samverkan med prospekteringsorganisationerna och gruvföretagen - som förhoppningsvis skall kunna dra nytta av den nya tekniken inom en snar framtid.

I programbeskrivningen talas en hel del om motiven för djupprospektering och om vad djupprospektering innebär. Man kan därför möjligen frestas att dra slutsatsen att STUs medel skall användas för att bedriva djupprospektering. Så är inte fallet.

STU har varken formella eller reella möjligheter att ge anslag till direkt prospektering.

Vägledande för inriktningen av insatsområdet har varit att se på hela djupprospekteringsförloppet och koncentrera de tekniska utvecklingsinsatserna till de mest kritiska och kostnadskrävande stegen. Alla inser att djupprospektering innebär stora kostnader och att detta framför allt beror på de omfattande borrningsinsatser som kommer att krävas. De höga kostnaderna för diamantborrning är i dag den mest hämmande faktorn för djupprospektering. Detta är skälet till att den grupp som diskuterat fram det här programförslaget entydigt kom fram till att högsta prioritet bör ges åt teknikutveckling som kan ge billigare och effektivare borrning. Gruppen konstaterade också att det finns behov och möjligheter till utveckling inom såväl geofysik som inom geologi och geokemi, vilket kortfattat exemplifieras i broschyren.

I den styrgrupp som STU tillsatt för insatsområdet ingår:

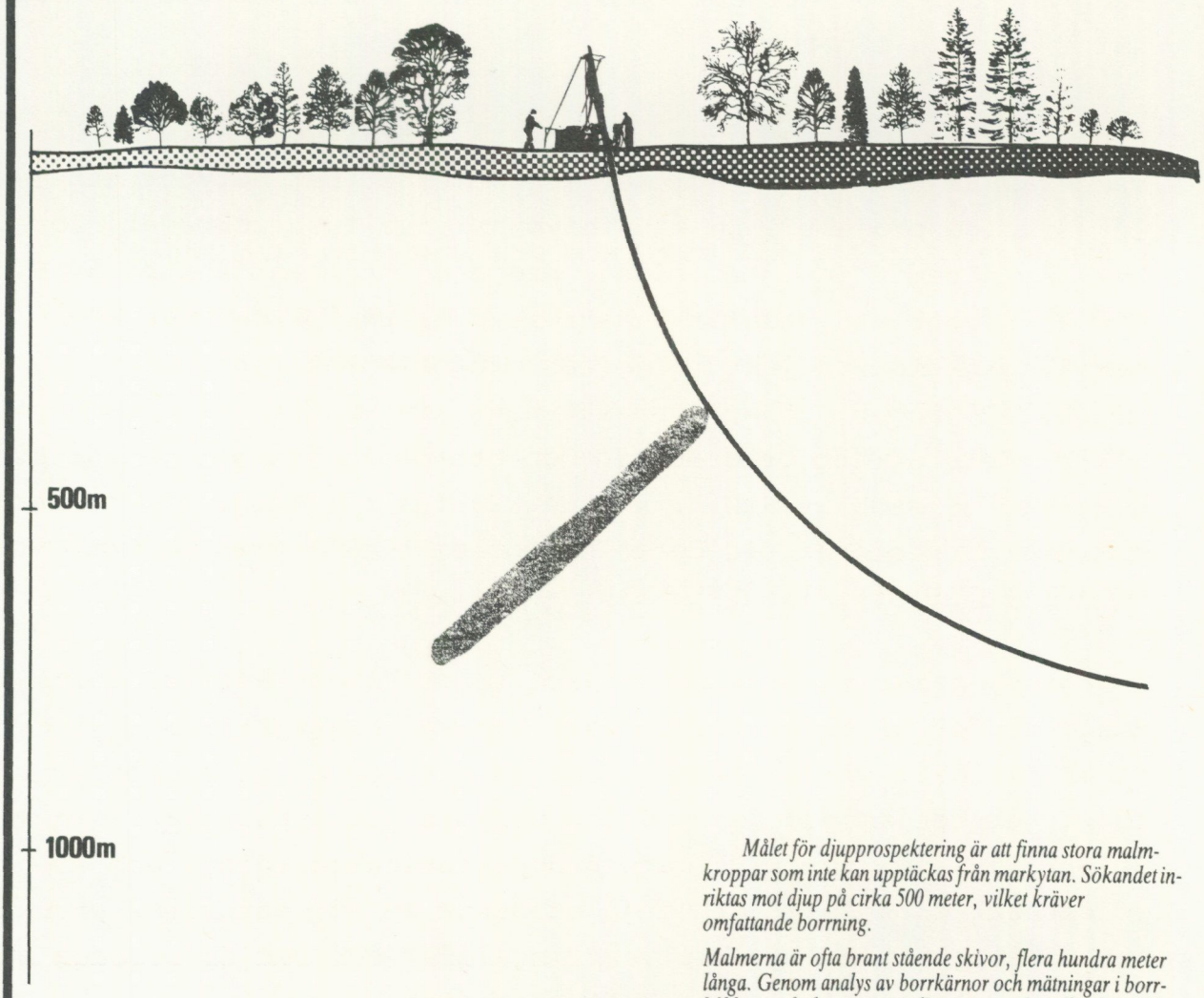
Torbjörn Thoring, Bergmästarämbetet i södra distriktet, ordf.
Sigvard Ljung, Nämnden för statens gruvegendom
Lennart Malmqvist, Boliden Mineral AB
Lars-Göran Ohlsson, LKAB Prospektering AB
Ulf Öquist, SGAB
och från STU Carl-Otto Frykfors, Helga Kärrman, som är sekreterare i gruppen, och Staffan Hjorth.

Styrgruppen har varit verksam bara i ett knappt halvår. Ansträngningarna har hittills nästan helt koncentrerats till borrningsteknikområdet. Vi är väl medvetna om att det är en mycket svår och av en del ansedd som omöjlig uppgift att åstadkomma teknikutveckling, som ger billigare prospekteringsborrning. Och även om STU har riskpengar är vi ju beroende av att det finns personer och företag som har goda utvecklingsidéer och som är beredda att engagera sig och driva utvecklingsarbetet.

Styrgruppen har i första hand tagit kontakt med företag i landet som utvecklar och tillverkar bergborrutrustningar. Vi har kontakt med bl.a. Craelius, Hagby Bruk, Atlas Copco, SGAB och

TEKNIKUTVECKLING FÖR

Djup-prospektering



Målet för djupprospektering är att finna stora malmkroppar som inte kan upptäckas från markytan. Sökandet inriktas mot djup på cirka 500 meter, vilket kräver omfattande borrning.

Malmerna är ofta brant stående skivor, flera hundra meter långa. Genom analys av borrkärnor och mätningar i borrhål kan malmkroppar som ligger runt och mellan borrhålen upptäckas.

STYRELSEN FÖR TEKNISK UTVECKLING

Tung Geoteknisk Borrning. Några projektförslag och utvecklingslinjer har presenterats och ett par förprojekt pågår eller är på väg att starta. Utvecklingsidéerna är intressanta men det är ännu för tidigt att uttala sig om projektens förutsättningar att lyckas.

Vi har dock ingalunda blivit överösta av ansökningar. Vi hoppas därför verkligen på fler förslag och projektidéer, det gäller både på borrningssidan och inom andra områden som geologi, geofysik och geokemi. Det behövs inga färdigformulerade projekt eller ansökningar. Styrgruppen och vi från STU ställer gärna upp på ett samtal. Och eftersom styrgruppen praktiskt taget mangrant deltar i det här symposiet har Ni ett utmärkt tillfälle här i dag och i morgon.

Projekt inom insatsområdet skall vara avslutade och kunna utvärderas ur praktisk synvinkel senast 1987. Det betyder att långsiktiga projekt inte kan inrymmas inom insatsområdet. Det betyder däremot inte att sådana projekt inte kan få stöd av STU. STU är berett att utanför insatsområdets ram prioritera även mer långsiktiga projekt kring för djupprospektering viktiga frågeställningar. Under förutsättning att vi får in några goda projektförslag att prioritera. Och ett bevis för att det är möjligt att få stöd av STU är väl det faktum att många av de resultat som presenteras vid detta symposium härrör från projekt som fått stöd av Styrelsen för teknisk utveckling.

Apatitjärnmalmerna inom Bergslagen; geokemiska undersökningar

Folke G. Back
Bergslagen Geologi AB
Blötbergsvägen 37 B
771 00 Ludvika

Följande redogörelse behandlar geokemiska undersökningar av apatitjärnmalmer och sidoberg inom Bergslagen. Undersökningsmaterialet ingår i sin helhet i en större sammanfattning över apatitjärnmalmernas geologi, kvantitativa och kvalitativa egenskaper

Järnmalmernas geologi har främst behandlats av Geijer & Magnusson (1944). Magnusson (1961) redovisar ett förslag att indela Bergslagens järnmalmer efter stratigrafiska principer. Denna indelning stöds av de undersökningar som visat järnmalmernas horisontbeständighet (Grip & Back, 1974), även om metallhalterna inte alltid är så höga att "malmbegreppet" kan brukas. Back (1974) har senare modifierat den magnussonska stratigrafin.

Apatitmalmernas bildningsbetingelser har blivit föremål för behandling av ett stort antal geologer (Johansson, 1910; Magnusson, 1938, 1970; Landergren, 1943). Föreslagna teorier skall dock icke beröras i detta sammanhang.

Inom Grängesbergsområdet uppträder ett antal malm-leptitstråk åtskilda av urgraniter. A_v malmtyperna dominerar den apatitrika järnmalmen. Dess stratigrafiska position bedöms som låg, och den centrala apatitmalmszonen, Gränges-Blötberget, tolkas som en uppstickande antiklinal.

Grängesmalmerna omsluts av natronleptiter. som mot liggandet övergår i kalibetonade leptiter (Fig. 1). Dessa innesluter den slir- och impregnationsutbildade mineraliseringstyp som benämns Lombergstypen karakteriserad förutom av strukturella skillnader av relativt låga P-halter och dominerande K-halt. Anmärkningsvärda apatitmängder med högt innehåll av REM-förande mineral har dock påträffats i detta malmstråk. (Tab. 1). Likartade apatitkoncentrationer återfinns på ett flertal ställen i sidoberget i häng och ligg.

Ett påfallande inslag inom Gränges-Risbergsfälten bildar gångbergarterna. Både skärande och konforma amfiboliter uppträder med hög frekvens inom vissa malmpartier. Flacka pegmatiter är vanligt förekommande, och man kan befara en tendens till ökad frekvens samt mäktighetsökning med tilltagande djup. Porfyrutbildade gångar påträffas sparsamt.

Förutom makroelementen Fe och P har förekomsten av mikroelement som V, Sn och sällsynta jordartsmetaller (REM) tillmätts potentiella stödvärden. Apatitmalmernas intressanta geokemi har således tilldragit sig uppmärksamhet.

Den första genomgripande undersökningen redovisas av Landergren (1943). Den omfattar analys av generalprover av malmerna.

På basis av dessa geokemiska undersökningar anlägger Landergren genetiska synpunkter på malmbildningsprocesserna.
I ett senare arbete redovisar Landergren(1948) innehållet av ett stort antal element (Ti,V,Cr,Mn,Fe,Co,Ni,Li,K,Mg,Rb,Be, Mo,W) i malmer och sidoberg från Grängesberg,Blötberget och Idkerberget.Vidare fastlägger han förekomsten av Y samt lantanider i ett malmprov från Blötberget.
Landergren betonar ånyo att alla malmer, alltså även apatitmalmerna, har sitt primära ursprung i sedimentär järnanrikning. P-malmerna syns alltså på goda grunder kunna placeras lågt i det föreslagna stratigrafiska mönstret.Detta innebär att vi vid prospekteringsöverväganden kan förvänta oss apatitmalmer även inom andra malmregioner (djupmalmer) vilka idag anses sakna denna malmtyp.
Björkstedt (1972) har i ett arbete undersökt innehållet av Sn och andra spårelement i Grängesberggrunden.Han finner Sn helt bundet till malmerna som kassiterit med ökad Sn-halt i de norra delarna med ett medelinnehåll av 90 g/t.För Strandberget noteras ca 155 g/t och i Lönnfallet ca 60 g/t.Magnetitfraktionen håller ca 50 g/t.
Adolfsson (1977) har försökt klarlägga om Sn ingår i några andra mineral än kassiterit.
Andersson (1972) redovisar innehållet av REM i svenska järnmalmer däribland samtliga apatitmalmer i Bergslagen,Resultaten framgår av Tab. 2-11.I apatitmalmerna är 45-75 % av REM bundet i monazit ($CePO_4$) och resten i apatit.
I en ny undersökning av ett antal malmprover fastställer Andersson (1974) REM-innehållet.Han finner bl a följande:
- REM-innehållet i råmalm är lågt och varierar med P-halten
- REM-innehållet i råmalm till ca 50 % gitterbundet i apatit
- REM-halten i anrikningssand beräknas till 0,5 %
- REM-halten i järnmalmslig med låg P-halt kan beräknas vara mycket låg

Tabell 12 visar halterna Y,La,Ce och Sn i uttagna produkter i samband med pilotförsök av Grängesmalm.Tabell 13 visar REM-halter i apatit från Grängesberg och Kola.
Brundin (1966) påvisade vid moränundersökningar söder Grängesberg anomala Sn-halter.
Inom ramen för den s k Malmbas-gruppens arbete undersöktes borrkärnor på förekomst av naturlig radioaktivitet (Th-U) i sidoberg och malmer (Landström,1974).Förutom U och Th analyserades vissa REM,dels i malm,dels i granit,pegmatit och leptit.Resultaten framgår av Tab. 14-15.
Av sidobergarterna uppvisar urgraniten en relativt jämn strålningsnivå vilket tyder på en homogen fördelning av U och Th.I stort sett gäller detsamma för leptit.Pegmatiterna är däremot, som väntat, mer radioaktiva än övriga sidobergerter och då U-mineralen dominerar är pegmatiterna en viktig bergart ur radonsynpunkt.Förutom fastställandet av ovan nämnda element önskade man bedöma olika möjligheter att indirekt kunna utnyttja naturlig strålning för kartering av viktiga element som REM och P. Kunskap om radiaktiva minerals förekomst och förmåga till värmegenerering krävs vid tolkning och utvärdering av temperaturmätningar i borrhål.

Dylika mätningar i borrhål har utförts bl a i Grängesberg, Risberg,Stollberg och Blötberget (Hasselström,1972).Landström (1978) ger en sammanfattande redogörelse över dessa undersökningar.
Malmbas-gruppen lät utföra en omfattande geokemisk analys av ett djupborrhål(Bh.C-5,Tabell 16).
Malmerna inom Blötbergsfältet är liksom Grängesmalmerna belägna i natronleptit.Kvartsrika,fosforfattiga varianter påträffas lokalt.U-Th-halter i malmer och sidoberg har fastlagts av Landström (1978) liksom specifik radonavgivning.
Apatitmalmerna i Idkerberget som kan betraktas som utbrutna liksom Lekombergsfyndigheten ligger i ett smalt bälte av tämligen grovkornig leptitgnejs.Malmerna uppträder som flera mot söder fältstupande linser i en amfibolitzon.Utförda geokemiska analyser i Tab.2,9 och 10.

Litteratur

Adolfsson S, 1977 — PM beträffande förekomsten av tenn i Grängesbergs Exportfält.Intern rapport, SSAB,Grängesberg

Andersson L-G,1972 — Sällsynta jordartsmetaller i svenska järnmalmer.STU-rapport 69-704/U 550 och 70-794/U 635

Andersson L-G,1974 — Sällsynta jordartsmetaller (REM) i Grängesberg.Intern rapport,SSAB, Grängesberg

Back FG & Grip E, 1974 — Malmstyrande strukturer i Bergslagen.STU-rapport 72-665/U 575 och 733212

Björkstedt K-A,1972 — Investigation to determine the content of tin and other trace elements in Grängesberg ore.GFF,Vol.94,2

Brundin N-H,1966 — Moränundersökningar för prospekteringsändamål.Opublicerad rapport över malmfondsprojekt nr 122.Mineograph,Gränges AB,Strässa

Geijer P & Magnusson N-H,1944 — De mellansvenska järnmalmernas geologi. SGU,Ser Ca,No 35

Hasselström A,1972 — Temperaturmätningar i djupborrhål vid svenska gruvfält.STU-rapport 71-507/U 407

Johansson H,1910 — Die Eisenerzführende Formation in der Gegend von Grängesberg.GFF,32

Koark H-J,1976 — Undersökning av apatitsliror från 685 m nivå,Grängesberg.Opublicerad rapport

Landergren S,1943 — Geokemiska studier över Grängesbergsfältets järnmalmer.IVA,Proceedings nr 172

Landergren S,1948 — On the geochemistry of Swedish iron ores and associated rocks.SGU,Ser C,nr 496

Landström O ,1974 — Preliminär undersökning av naturlig radioaktivitet (U-Th) i sidobergarter och malm i Grängesberg.Intern rapport, Gränges AB

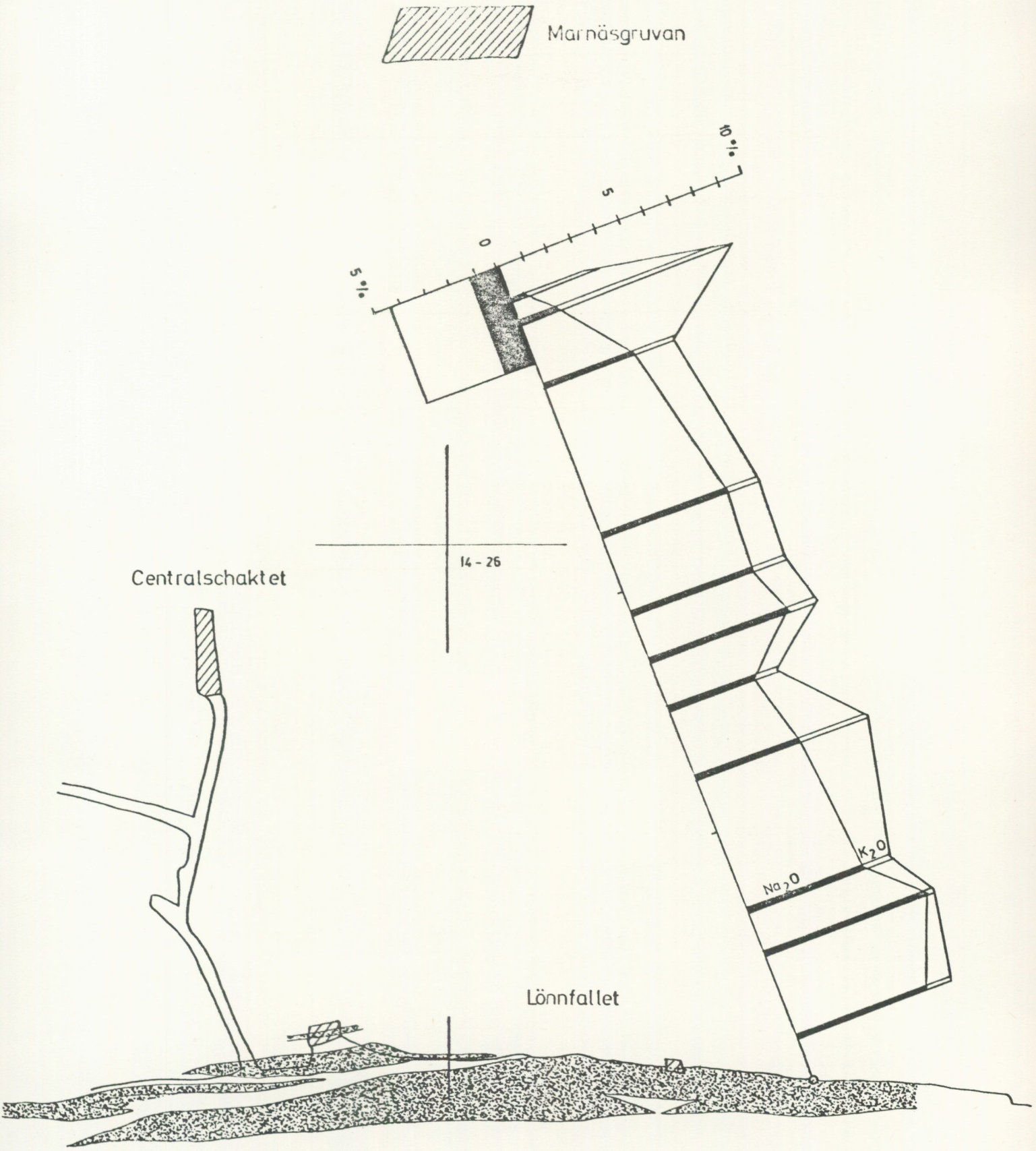
Landström O,1978 — Studium över radioaktiva minerals utbredning i svenska gruvor.Svenska Gruvföreningen,Ser.B,nr 242

Magnusson N-H,1938 — Neue Untersuchungen innerhalb des Grängesfeldes.SGU,Ser C,No 418

Magnusson N-H,1961 — Mellersta Sveriges järnmalmstillgångar. JKA,Vol.145

Magnusson N-H,1970 — The origin of the iron ores in Central Sweden and the history of their alterations.SGU,Ser C,nr 643

Fig.1



Na_2O - K_2O - halter, Bh 214
Lönnfallet - Marnäsgruvan
Skala 1:1000

FGB 1974

Tabell 1. Apatitsliror, 686 m nivå, krosstation, Grängesberg
Prov: FG Back; Analys: H-J Koark, 1976
Mineralinnehåll: apatit, magnetit, amfibol, biotit, plagioklas, titanit, ortit

	Ortit	Titanit	Apatit
SiO_2	34,0 %	31,0 %	- %
TiO_2	< 0,5	31,0	-
P_2O_5	-	1,0	39,69
Al_2O_3	15,0	3,0	-
FeO	15,0	2,0	-
MgO	< 0,5	< 1,0	-
CaO	14,5	29,0	55,78
Na_2O	-	-	1,05
CeO	6,8	-	-
La_2O_3	5,4	-	-
Y_2O_3	~ 1,0	-	-
Th	< 0,1	-	-
F	-	-	1,8(?)
OH^-	ej anal.	-	-
	91,7	98,0	98,32

(analys av titanit och apatit: sistnämnda fasen dock endast partiell d v s ej Cl och REM)

Tabell 2

Fyndighet och produkt	ΣRE-oxider Totalt ppm	Apatitbundet ppm	Apatitbundet %	Monazitbundet[1] ppm	Monazitbundet[1] %
Blötberget					
hämatitslig	1200	190	16	1010	84
magnetitslig	370	74	20	296	80
avfall	1400	340	24	1060	76
Grängesberg					
ingående	950	310	33	640	67
pelletslig	360	83	23	277	77
apatitslig	7100	5800	81	1300	19
avfall[2]	2800	450	16	2350	84
Idkerberget					
malmprodukter[3]	1400	(340)[4]	(24)[4]	(1060)[4]	(76)[4]
avfall	1000	(310)[4]	(31)[4]	(690)[4]	(69)[4]
Risbergsfältet					
ingående	900	270	30	630	70

1) häri inräknas även RE bundet till andra RE-förande mineral.
2) vägt medelvärde för 3 st produkter.
3) styckemalm och mull.
4) osäker siffra.

Tabell 3

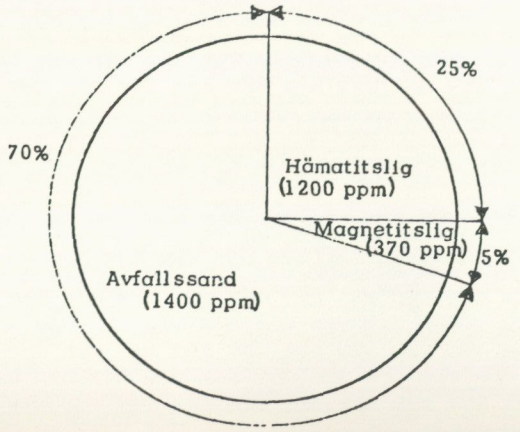
Fördelning av RE och Sc (ppm) i anrikningsprodukterna från Blötbergsgruvans malm.

	Ingående (beräkn)	Hämatitslig	Magnetitslig	Avfallssand
La	225	230	70	260
Ce	433	450	130	500
Pr	37	37	11	43
Nd	154	180	46	170
Sm	24	23	8	28
Eu	11	10	3	13
Gd	19	19	6	22
Tb	4	3	1	5
Dy	13	10	5	16
Ho	4	3	2	5
Er	7	5	3	8
Tm	-	1	< 1	1
Yb	10	9	7	11
Lu	-	< 1	< 1	1
Y	81	59	22	104
Σ RE	1022	1039	314	1187
Σ RE-oxider	1200	1200	370	1400
Sc	3	2	1	4

Tabell 4

Procentuell fördelning av ingåendets RE- och Sc-mängd på produkter från Blötbergsgruvan's anrikningsverk.

Vikts-%	Hämatitslig 24.9	Magnetitslig 14.7	Avfallssand 60.4
La	26	5	70
Ce	26	4	70
Pr	25	4	71
Nd	29	4	67
Sm	24	5	71
Eu	23	4	73
Gd	25	5	70
Tb	19	4	77
Dy	19	6	75
Ho	18	7	74
Er	19	7	74
Tm	-	-	-
Yo	23	10	67
Lu	-	-	-
Y	18	4	78
Σ RE	25	5	70
Sc	16	5	79



Tabell 5

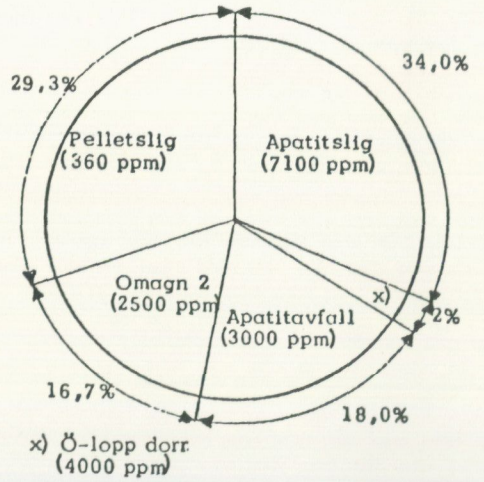
Fördelning av RE och Sc (ppm) i produkter från anrikningsförsök på Grängesbergsgruvans malm.

Ämne	Ingående beräkn	Ingående analys	Pelletslig	Apatitslig	Ö-lopp dorr	Apatitavfall	Omagn 2
La	202	175	82	1120	850	630	580
Ce	344	330	135	1900	1500	1130	990
Pr	19	21	7,5	120	85	62	46
Nd	118	115	43	840	466	355	285
Sm	22	20	6	210	70	60	40
Eu	9	7	3	70	30	34	20
Gd	15	14	3	190	32	30	20
Tb	4	4	1	35	10	9	7
Dy	13	14	3	165	32	30	15
Ho	4	4	1	35	11	11	6
Er	6	8	1,5	70	20	18	5
Tm	-	< 0,5	< 0,3	5	< 1	1	< 1
Yb	6	8	2,5	45	17	16	5
Lu	1	1	0,3	10	2	2	< 1
Y	88	81	16	1200	257	202	58
Sc	2	2	1	15	3	5	6
Σ RE	852	804	306	6030	3385	2595	2083
Σ RE-oxider	1000	950	360	7100	4000	3000	2500

Tabell 6

Procentuell fördelning av ingåendets RE- och Sc-mängd på produkter vid anrikningsförsök på Grängesbergsgruvans malm.

Ämne	Pelletslig	Apatitslig	Ö-lopp dorr	Apatitavfall	Omagn 2	Summa
Vikts-%	82	4.8	0.5	6.0	6.7	
La	33,3	26,6	2,1	18,7	19,2	99,9
Ce	32,2	26,5	2,2	19,7	19,3	99,9
Pr	32,1	30,1	2,2	19,4	16,1	99,9
Nd	29,8	34,1	2,0	18,0	16,1	100,0
Sm	22,7	46,6	1,6	16,6	12,4	99,9
Eu	26,3	36,0	1,6	21,8	14,3	100,0
Gd	16,5	61,3	1,1	12,1	9,0	100,0
Tb	23,0	47,2	1,4	15,2	13,2	100,0
Dy	18,4	59,3	1,2	13,5	7,5	99,9
Ho	22,7	46,5	1,5	18,2	11,1	100,0
Er	20,1	55,0	1,6	17,7	5,5	99,9
Tm	-	-	-	-	-	-
Yb	36,7	38,6	1,5	17,2	6,0	100,0
Lu	28,7	56,1	1,2	14,0	-	100,0
Y	14,9	65,4	1,5	13,8	4,4	100,0
Sc	36,3	31,9	0,7	13,3	17,8	100,0
Σ RE-oxider	29,3	34,0	2,0	18,0	16,7	100,0



Tabell 7

Fördelning av RE (ppm) i produkter vid koncentrering av RE-förande mineral.

Malmprov från Grängesberg.

Produkt	La	Ce	Nd	Pr	Y
(1)	250	630	220	< 50	140
(2)	< 50	200	< 50	< 50	< 50
(3)	1 220	2 410	1 200	290	980
(4)	490	1 030	320	120	470
(5)	1 230	2 610	1 310	320	1 230
(6)	1 140	1 920	720	160	430
(7)	1 730	3 070	1 700	300	1 030
(8)	3 410	5 930	2 560	-	840
(9)	380	1 080	1 200	180	1 180
(10)	310	700	280	< 50	< 50
(11)	350	1 240	1 200	170	1 290
(12)	310	1 180	1 100	-	2 270
(13)	900	2 430	1 340	-	-
(14)		ej analyserad			
(15)	350	700	280	80	280
(16)		ej analyserad			
(17)	1 610	2 920	970	160	< 50

Tabell 8

Fördelning av RE (ppm) i apatiter från Grängesbergsmalmen.

	1	2	3	4	medelvärde
La	490	310	830	260	470
Ce	1450	1180	2120	1000	1440
Nd	1090	1100	1140	690	1000
Y	1650	2270	1380	2180	1870
Σ La,Ce, Nd,Y	4680	4860	5470	4130	4780
Σ RE-oxider	6600	6800	7700	5800	6700

Tabell 9

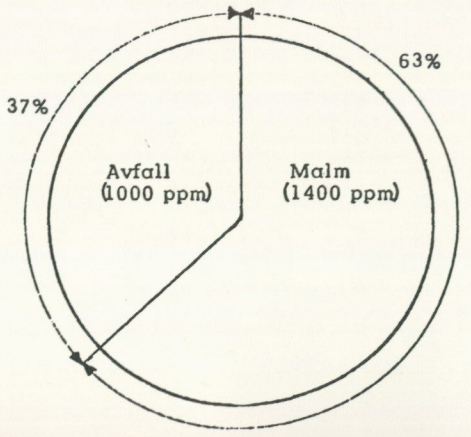
Fördelning av RE (ppm) i analyserade prover från Idkerbergsgruvans anrikningsverk.

	Ingående (beräkn)	Malm	Avfall
La	250	350	130
Ce	400	460	320
Nd	130	150	110
Y	110	80	140
Σ La,Ce,Nd,Y	890	1040	700
Σ RE-oxider (beräkn)	1250	1400	1000

Tabell 10

Procentuella fördelningen av ingåendets RE-mängd på produkter från Idkerbergsgruvans anrikningsverk.

	Malm	Avfall
Vikts-%	55	45
La	77	23
Ce	64	36
Nd	63	37
Y	41	59
Σ RE-oxider	63	37



Tabell 11. Fördelning RE (ppm) ingående malm Risbergsfältet

La	190
Ce	290
Nd	62
Y	85
Σ RE	627
Σ RE-oxider (beräkn.)	900

Tabell 12. Halter (ppm) Y,La,Ce,Sn i uttagna produkter, pilotförsök Grängesmalm, Min.-proc.-lab, Stråssa

	Fe-konc Fe_3O_4+Fe_2O_3		MC-prod[1] (6,6 % P)		Apatit-konc (17 % P)		Apatit-avfall	
	ML	AE	ML	AE	ML	AE	ML	AE
Y	19	50	3700	1400	5600	1300	610	300
La	130	-	2730	-	3250	-	930	-
Ce	200	200	4960	4000	1700	1600	1600	2100
Sn	26	200	-	200	270	210	430	550

1/MC=magnetiska produkter ur apatitkoncentrat

Tabell 13. REM-halter (ppm) i Grängesapatit och Kola-apatit (Analys: Supra, 1973)

	Gränges-apatit	Kola-apatit
Y	1630	395
La	670	2600
Ce	1500	3600
Pr	185	275
Nd	1050	1200
Sm	260	185
Eu	75	100
Gd	375	300
Tb	45	20
Dy	210	60
Ho	155	60
Er	100	15
Tm	40	15
Yb	60	10
Lu	20	< 5

Tabell 14. Th- och U-halter (ppm) i sidobergarter samt Th/U

Bergart	Bh-nr	Sekt.(m)	Th	U	Th/U
Urgranit	J-3	4- 5	16,5	5,40	3,05
"	"	24- 25	16,6	5,74	2,88
"	"	44- 45	10,2	3,85	2,64
"	"	74- 75	14,0	5,26	2,66
"	"	99-100	16,8	6,67	2,52
"	"	133-134	14,7	6,14	2,40
"	"	160-161	13,4	6,37	2,10
		Medelvärde	14,6	5,63	
Leptit	"	244-245	9,2	3,69	2,50
"	"	280-281	11,2	3,58	3,14
"	"	335-336	13,8	5,76	2,40
"	"	493-494	12,8	3,33	3,83
"	"	507-508	7,4	3,22	2,28
		Medelvärde	10,9	3,92	
Pegmatit	J-2	355-358	11,3	34,53	0,33
"	"	452-455	6,8	20,12	0,34
"	J-3	139-142	5,6	16,14	0,35
"	"	166-169	3,1	11,01	0,28
"	"	357-360	1,8	33,43	0,054
"	"	410-413	0,7	12,58	0,056
"	"	484-487	0,4	12,17	0,033
		Medelvärde		20,00	

Tabell 14 a. Halter Fe,P,V och alkali i leptit (%), Bh.J-3

			Fe	P	V	Na_2O	K_2O
Leptit	J-3	244-245	3,2	0,25	0,01	6,6	0,45
"	"	280-281	4,0	0,045	0,14	6,4	0,72
"	"	335-336	3,5	0,20	0,01	5,8	1,8
"	"	493-494	4,2	0,45	0,01	5,2	1,5
"	"	507-508	3,4	0,16	0,01	6,2	0,95

Tabell 15.Th-,U- och REM-halter (ppm) i malm,Bh.J-2

Bergart	Bh.nr	Sekt.	Th	U	La	Ce	Sm	Eu
Malm	J-2	311,00-313,00	7,5	10,07	431	745	53	16
"	"	313 -315	14,4	2,94	799	1335	90	28
"	"	319 -321	5,5	12,65	366	578	47	12
"	"	321,00-323,45	4,6	13,20	248	475	35	10
"	"	324,14-326,00	3,7	17,86	172	337	24	5,4
"	"	326,00-328,00	2,4	17,75	152	290	19	5,0
"	"	328,00-330,00	3,4	7,71	163	304	20	4,7
"	"	331,47-334,32	3,7	0,87	430	430	35	4,8
"	"	334,32-336,03	2,2	3,28	213	304	10	3,7
"	"	336,03-338,03	2,9	1,73	440	536	11	4,5

Tabell 15 a. Jämförelse mellan La,Ce och Sm i malmprover från Bh.J-2 och i monazit (ppm)

			La	Ce	Sm
Monazit			133000	230000	15000
			8,87:	15,33:	1
Malm	J-2	311,00-313,00	8,13	14,06	1
"	"	313 -315	8,88	14,83	1
"	"	319 -321	7,79	12,30	1
"	"	321,00-323,45	7,09	13,57	1
"	"	324,14-326,00	7,20	14,04	1
"	"	326,00-328,00	8,00	15,26	1
"	"	328 -330	8,20	15,20	1
"	"	331,47-334,32	12,3	12,28	1
"	"	334,32-336,03	21,3	30,4	1
"	"	336,03-338,03	40,0	48,7	1

Tabell 15 b. Halter Fe,P,V och alkali (%) i ovan nämnda sektioner

			Fe	P	V	Na_2O	K_2O
Malm	J-2	311,00-313,00	52,7	2,4	0,16	0,04	0,16
"	"	se ovan	50,6	4,2	0,01	0,05	0,35
"	"	"	62,3	1,7	0,17	0,04	0,06
"	"	"	62,8	1,6	0,06	0,04	0,14
"	"	"	61,5	0,99	0,12	0,06	0,25
"	"	"	62,8	0,75	0,08	0,04	0,07
"	"	"	63,5	0,75	0,13	0,03	0,08
"	"	"	62,5	0,68	0,06	0,37	0,24
"	"	"	60,2	0,16	0,02	0,03	0,08

Tabell 16

Dbh C 5, Grängesberg, 515 m nivå

Analyser: ML, Gränges AB, Strässa /74

Till djup cm	Nr	Fe %	P %	V 0,01 %	Na_2O %	K_2O %	Y 0,01 %	Ce 0,01 %	Cu 0,01 %	Mn %	CaO %	MgO %	Al_2O_3 %	TiO_2 %	SiO_2 %
210	1	41,0	1,4	15	0,31	2,9	4	4	2	.21	4,2	5,1	4,6	.39	15,1
550	2	59,4	1,1	20	0,04	1,1	2	1	3	.22	3,1	2,3	1,9	.18	5,4
815	3	59,8	1,1	20	0,09	1,0	2	1	4	.26	3,4	2,0	1,8	.21	5,0
1 140	4	55,3	2,4	18	0,03	1,0	4	4	2	.16	6,9	2,6	1,6	.20	5,0
1 340	5	54,2	1,1	18	0,09	1,4	2	2	2	.14	3,6	3,7	1,7	.17	10,2
1 540	6	49,2	1,5	16	0,11	0,83	2	3	1	.14	6,0	3,8	.86	.16	15,1
1 740	7	45,7	1,3	17	0,11	0,19	1	4	0,5	.14	6,8	4,2	.38	.30	19,1
1 940	8	29,8	1,9	10	0,26	0,25	3	7	0,5	.18	9,1	6,8	.32	.20	29,8
2 140	9	31,8	3,6	11	0,23	0,44	6	10	1	.15	14,0	5,8	.71	.15	21,0
2 423	10	60,2	1,4	21	0,04	0,79	1	3	3	.22	4,1	1,8	1,2	.19	4,6
3 695	11	60,7	1,2	18	0,03	0,41	1	4	2						
3 965	12	60,8	1,1	18	0,02	0,40	1	4	2						
4 702	13	57,7	1,6	18	0,08	0,73	2	4	2						
4 902	14	45,5	2,5	15	0,09	0,91	4	11	2						
5 102	15	42,9	2,0	14	0,13	0,94	3	5	2						
5 303	16	59,9	0,7	19	0,03	0,71	1	2	2						
5 502	17	41,8	2,0	13	0,13	1,1	5	8	1						
5 700	18	56,9	1,8	18	0,15	0,53	1	3	2						
5 924	19	52,3	2,1	17	0,10	0,15	2	5	1						
6 298	20	43,9	1,3	14	0,75	0,73	1	2	1						
6 600	21	56,0	1,4	20	0,08	0,34	1	3	1						
6 800	22	62,6	1,0	21	0,02	0,48	1	2	3						
7 000	23	55,2	2,0	17	0,04	0,90	2	4	3						
7 200	24	53,1	1,8	17	0,08	1,04	2	4	3						
7 400	25	45,6	2,1	16	0,14	0,42	2	6	2						
7 600	26	50,9	2,0	16	0,08	1,56	4	4	3						
7 800	27	52,0	1,7	15	0,08	1,28	7	7	3						
8 000	28	28,8	4,2	9	0,24	0,18	8	18	0,5						
8 200	29	55,9	2,2	17	0,06	0,28	3	5	1						
8 400	30	57,2	1,9	18	0,04	0,38	2	5	2						
8 600	31	57,2	2,0	17	0,05	0,63	2	5	4						
8 765	32	31,1	2,7	8	0,19	1,4	8	6	3						
9 200	33	58,9	1,3	15	0,03	0,91	2	4	3						
9 400	34	23,4	1,8	6	0,32	0,14	3	10	0,5						
9 650	34a	19,4	2,0	5	0,35	0,09	6	14	0,5						
9 850	35	62,0	1,3	14	0,03	0,16	2	3	1						
10 050	36	46,3	3,0	10	0,11	0,13	5	11	0,5						
10 200	37	58,1	1,4	12	0,02	0,16	1	5	0,5						
10 450	38	60,4	1,3	11	0,04	0,32	1	3	1						
10,650	39	56,2	1,6	11	0,06	0,22	1	5	1						
10 850	40	59,3	1,9	18	0,04	0,27	1	4	2						
11 050	41	62,3	1,0	19	0,02	0,50	1	2	2						

Tabell 16

sid 2

Till djup cm	Nr	Fe %	P %	V 0,01 %	Na_2O %	K_2O %	Y 0,01 %	Ce 0,01 %	Sn 0,01 %
11 250	42	61,4	0,94	19	0,03	0,63	1	1	3
11 450	43	61,9	1,0	18	0,03	0,57	1	2	3
11 650	44	56,3	2,0	17	0,03	0,74	2	5	2
11 850	45	59,2	1,4	18	0,04	0,75	1	3	3
12 055	46	60,5	1,4	18	0,07	0,70	2	2	3
12 390	47	61,4	1,5	18	0,03	0,57	1	3	2
12 600	48	60,3	1,8	19	0,03	0,14	1	4	1
12 800	49	62,1	1,3	19	0,05	0,12	1	2	0,5
13 000	50	62,6	1,3	22	0,03	0,17	1	2	2
13 200	51	63,7	0,98	23	0,01	0,42	1	2	2
13 400	52	61,7	1,7	22	0,05	0,29	1	2	2
13 600	53	56,6	1,6	21	0,09	0,11	1	4	2
13 800	54	60,5	0,90	22	0,08	0,13	1	2	1
14 000	55	60,4	1,4	23	0,03	0,59	1	4	2
14 192	55a	63,0	0,96	22	0,06	0,60	1	3	3
14 695	56	62,3	0,79	23	0,03	0,52	1	1	1
14 910	57	52,3	1,1	19	0,12	0,09	1	3	1
15 125	58	55,5	1,1	21	0,09	0,14	1	4	0,5
15 325	59	59,0	1,4	22	0,04	0,05	1	4	1
15 525	60	54,9	0,84	20	0,11	0,14	1	2	1
15 770	61	62,0	0,92	20	0,03	0,43	1	2	1
17 785	62	63,8	0,93	22	0,01	0,23	1	3	2
18	63	60,2	1,2	21	0,07	0,44	4	9	1
18 390	64	60,2	1,2	21	0,07	0,44	1	5	2
19 225	65	49,6	1,4	17	0,27	1,4	2	4	2
19 950	66	61,7	1,3	22	0,01	0,45	1	6	2
19	67	46,9	2,6	16	0,09	1,1	4	12	2
19 996	68	53,9	2,4	15	0,03	0,46	3	8	1
20 237	69	63,2	1,2	16	0,01	0,31	1	4	1
21 074	70	58,1	2,2	20	0,02	0,02	2	6	4
26 160	71	59,9	0,67	21	0,26	0,27	1	3	1
28 150	72	62,6	1,3	28	0,02	0,02	1	5	1
28 350	73	64.7	0,78	27	0,02	0,03	1	2	1
28 550	74	66,6	0,72	23	0,02	0,12	1	1	1
28 750	75	67,2	0,44	25	0,05	0,06	1	1	1
28 950	76	64,5	0,98	24	0,06	0,09	1	3	0,5
29 150	77	64,3	1,4	25	0,03	0,05	1	4	0,5
29 350	78	62,5	0,82	25	0,11	0,20	1	2	1
29 575	79	60,1	0,78	20	0,08	0,56	1	3	1
	80	-	-	-	-	-	-	-	-
	81	-	-	-	-	-	-	-	-
	82	54,9	1,5	19	0,03	0,88	2	8	2

Tabell 16

sid 3

Till djup cm	Nr	Fe %	P %	V 0,01 %	Na_2O %	K_2O %	Y 0,01 %	Ce 0,01 %	Sn 0,01 %
31 100	83	57,8	1,4	20	0,03	0,58	1	4	1
31 300	84	59,8	2,3	21	0,02	0,22	2	6	2
	85	65,8	0,59	21	0,02	0,34	1	2	2
32 350	86	64,3	1,1	19	0,04	0,11	1	2	1
32 550	87	64,3	1,1	22	0,04	0,11	1	2	2
32 700	88	62,5	1,8	18	0,38	0,39	1	5	1
32 998	89	57,2	1,2	17	0,24	0,73	1	4	0,5
33 300	90	59,4	1,7	21	0,01	0,50	1	6	1
33 500	91	60,1	1,9	21	0,01	0,33	1	6	1
33 700	92	59,2	1,9	21	0,01	0,42	1	5	2
33 900	93	55,1	2,9	20	0,02	0,55	3	7	2
34 115	94	54,6	2,1	21	0,02	0,78	2	6	2
34 970	95	58,3	2,2	21	0,05	0,11	2	5	3
35 200	96	62,1	1,2	22	0,05	0,04	1	3	2
35 430	97	57,8	1,9	22	0,05	0,13	2	6	2
35 670	98	57,4	2,2	21	0,01	0,49	2	7	3
36 795	99	51,8	2,1	19	0,12	0,34	3	6	2
37 020	100	55,5	1,8	19	0,12	0,40	2	6	2
37 245	101	60,5	1,3	22	0,01	0,35	1	6	1
37 470	102	48,0	2,7	18	0,09	0,26	4	8	2
37 690	103	51,8	2,0	19	0,03	1,3	4	15	1
39 170	104	61,1	0,45	19	0,02	0,25	1	1	1
39 390	105	54,7	1,2	16	0,12	0,08	1	3	1

KVICKSILVER OCH ANDRA ELEMENT VID NÅGRA MALMER I BERGSLAGEN

Sven Arvidsson
Sveriges geologiska undersökning
Box 670
751 28 UPPSALA

Det har sedan länge varit känt att kvicksilver kan finnas associerat med sulfidmalmer. I Sala anträffades, enligt uppgift i Tegengren (1924) kvicksilver redan 1660. Ödman (1945) visade på kvicksilver i Laver och Grip (1948) beskrev förekomsten av kvicksilver i Boliden och andra gruvor i Skelleftefältet. Saukov (1946) utvecklade teorin kring kvicksilvrets uppträdande kring olika malmtyper, men fortfarande var analysmetoderna inte tillräckligt känsliga för att mera omfattande kvicksilverundersökningar skulle kunna genomföras. Noggrannare undersökningar kunde visserligen göras - t ex dem som företogs av Stock (1934) för att få underlag till clarkevärdet - en stor mängd material behandlades så att kvicksilver kunde uppslutas tills man erhöll en Hg-pärla vars diameter var mätbar. Det var emellertid först på 1960-talet som relativt billiga analysmetoder utvecklades.

I Sverige skedde det i samband med att kvicksilvrets miljömässiga uppträdande uppmärksammades. Först användes neutronaktivering, som gav god noggrannhet och bra känslighet även vid låga värden. Nackdelen var främst att analyserna blev dyra. Efterhand utvecklades atomabsorbtion till nöjaktig noggrannhet och känslighet och med en acceptabel kostnad. Det material som förekommer här är analyserat huvudsakligen vid Geologiska institutionen KTH (där ett atomabsorptionsinstrument för Hg-analys byggdes), vid Statens Provningsanstalt, Stockholm, (Lidums, 1968) som också utnyttjade atomabsorptionsinstrument samt vid AB Isotopteknik, Stockholm (nu inom Tekniska röntgencentralen) som utnyttjade neutronaktivering (Sjöstrand 1964). Kontroll mellan labben erhölls genom att standardprover fanns med och med dubbelprover etc.

För att testa Saukovs (1946) teorier om aureolbildning av Hg runt sulfidmalmer söktes en blind malm för undersökningen. (Materialet redovisas utförligt av Arvidsson 1982). Valet föll på Wallinmalmen i Falun (Figur 1 o 2) som är en numera nästan utbruten nära vertikalt stupande malmkropp, som sträcker sig mellan 350 och 460 m djup, med högsta mäktighet av 15 m och största längd av 50 m. Malmen är pyritisk och håller även zinkblände och

blyglans. Tonnaget beräknas till 340 kton med genomsnittshalterna 11 % Zn och 6 % Pb. För att få någon jämförelse analyserades även andra element spektrografiskt dels vid Analytica, dels på SGU med DJUMBO och sulfid-isoformering. Eftersom malmen var utbruten till stora delar provtogs huvudsakligen diamantborrkärnor från 280 m till 600 m avvägning.

För att kunna se vad som är anomalt bör man känna till vad som är normalt, d v s bakgrunden. För Mellansverige har material från Henriques et al, (1970) använts. I figur 3 visas Hg-halten i 175 prover från Mellansverige.

Med utgångspunkt från denna figur har tröskelvärdet satts till 10 ppb för kvicksilver.

För övriga element har det inte varit lika lätt att bestämma ett tröskelvärde då motsvarande bakgrundsvärden inte har undersökts på det aktuella materialet. Olika ansatser har emellertid provats på materialet från Falu gruva för att försöka finna lokala bakgrunden.

Histogram har upprättats över det aktuella materialet där även Hg finns medtaget (Figur 4). Ur de bimodala populationerna är det nära till hands att anta att den lägre representerar bakgrunden, medan de högre representerar anomalierna.

Metoden med plottning på normalfördelningspapper eller lognormalfördelningspapper som föreslogs av Tennant & White (1959) har tillämpats i en del fall här. Som jämförelse visas Hg även i lognormaldiagram tillsammans med Ag Bi Mo. (Figur 5 o 6).

Gemensamt för dessa metoder är att resultatet är beroende av provtagningen såtillvida att den bör vara jämnt fördelad över det område som omfattas av provtagningen.

De tröskelvärden som valts med utgångspunkt från aktuellt material framgår av tabell 1, där material från andra liknande undersökningar har medtagits för jämförelse.

Anomalibilden vid Wallinmalmen för kvicksilver och zink framgår av figur 7 o 8.

Proverna är i detta fall inte tagna i ett homogent material såtillvida som de utgörs av flera olika bergarter. De noterade kvicksilverhalterna kan emellertid inte relateras till någon specifik bergart, malmerna undantagna.

Korrelationer mellan elementen har även framtagits för SELLO-transformerade värden (se Lindqvist, 1976). Relationerna har illustrerats i figur 9 där absoluta värden större än eller lika med 0.4 har tagits med.

En begränsad undersökning genomfördes sedan i Stollberg där tre borrkärnor som skär genom Hasse- och Brusmalmen på 270 m nivå provtogs (Figur 10 o 11).

Båda malmerna som är av Pb-Zn-typ är numera utbrutna. Brusmalmen som är nära vertikalt stupande omges av leptit vars fältspat är kalidominant. Nära malmen är leptiten mer eller mindre silicifierad. Malmen är i de rikaste delarna en brecciamalm som övergår i kulmalm med cm-stora fragment av leptit, kvartsit eller kalksten, I malmen finner man vanligtvis flusspat och kalcit på sina ställen. Huvudsakliga malmmineral är blyglans och zinkblände. Halterna i bruten malm har angetts till ca 15 % Pb och 3 % Zn.

Hassemalmen som anstår 40 m öster om Brusmalmen är mindre och är omgiven av delvis förskarnad kalksten. Hassemalmen skiljer sig eljest från Brusmalmen genom att blyhalterna är lägre.

Provtagningen gjordes i kärnorna med målet att undersöka ev gradienter som kunde förväntas i kvicksilverhalt. Provtagningen framgår av figur 12.

Liksom fallet var vid Wallinmalmen i Falun har förutom kvicksilver flera ämnen analyserats och analyserna har gjorts på samma sätt, vid samma laboratorier och samtidigt som proverna från Wallinmalmen.

Resultaten av bly, zink och kvicksilver framgår av figur 13. Lägg särskilt märke till kvicksilverhalterna som är nära 10 ppb i berget intill Hassemalmen, medan halterna i närheten av Brusmalmen är lägre, en eller några få ppb bara.

Zink är vid Hassemalmen anomalt direkt i malmen, till vänster på bilden, samt visar en tendens att stiga längst bort från malmen, till höger. Detta kan antyda existensen av en zinkanomali. F ö finns en svag kvicksilver-anomali som stäcker sig ca 15 m från malmen.

Vid Brusmalmen är kvicksilvret anomalt endast i direkt anslutning till malmen, medan bly i (Ddh 5) är anomalt i början av kärnan fram mot malmen så när som på ett prov nära malmen som ligger lägre. Zink är också anomalt intill malmen, men visar en anomalibild på andra malmen i förhållande till zinkanomalin. Samma förhållande men mindre accentuerat kan iakttas i Ddh 1. Observera att hålen i Brusmalmen är borrade åt olika håll. Tendensen med blyanomali väster om Brusmalmen kan även observeras i gruvan i form av en svag mineralisering ca 15 m från malmen.

En undersökning liknande de nyssnämnda gjordes även i Zinkgruvan. Avsikten var att i denna Zn-rika malm få en jämförelse med de blyrika malmerna i Stollbergsfältet. Provtagningen gjordes såväl i malm som i sidoberg.

Av störst intresse för möjligheterna att utnyttja kvicksilver eller något annat element som prospekteringshjälpmedel är proven som är tagna i sidoberget på avstånd från malmen. Proven från 500 m-nivån torde ge bäst ledning härvidlag, då de skär tvärs stratigrafin.

Geologin framgår av figur 14 där stratigrafiskt uppåt är neråt i figuren. Underst är grå leptit. Zinkmalm förekommer i två lager, huvudmalmen och parallellmalmen, som skiljs åt av grå leptit. Därpå följer en skarnbandad leptit, som övergår i grå leptit för att efter ytterligare en zon av skarnbandning följas av ådergnejs närmast schaktet.

Liksom vid de tidigare nämnda malmerna har bakgrundsvärdena undersökts för att få fram ett tröskelvärde. Med utgångspunkt från tröskelvärdet kan anomalibilden ritas upp, vilket framgår av figur 15. Anomala halter förekommer främst av Zn, Pb, Cu och Hg.

Anomalibilden i Zinkgruvan verkar vara stratigrafiskt betingad. Detta antagande stöds av Hg/Zn-förhållandet som på liggsidan (ca 15 m eller mer stratigrafiskt under parallellmalmen) är av storleksordningen 1.10^{-3}, medan det eljest är av storleksordningen 1.10^{-5}.

Sammanfattningsvis har dessa begränsade undersökningar visat att det finns anomalier:

- vid Wallinmalmen främst av Hg-Zn runt och över malmkroppen
- vid Stollberg, Hg-anomali i kalkstenen vid Hassemalmen samt mycket svaga Pb-Zn anomalier vid Brusmalmen
- vid Zinkgruvan av Hg, Zn men även Pb och Cu.

Resultatet visar att kvicksilverhalter över 10 ppb kan vara malmindikerande, men alla sulfidmalmer är inte associerade med höga kvicksilverhalter. Kvicksilvergeokemi kan således inte bli någon prospekteringsmetod som utesluter förekomster av sulfidmalm, men kan användas som komplement till andra metoder.

Referenser

Andersson, S., Andersson, W. och Malmqvist, J., 1976: Rapport STU Projekt 154/1973 Del III, Styrelsen för teknisk utveckling.

Arvidsson, S., 1982: Mercury and Other Frace Elements as a Prospekcting Guide för Sulphide Ores in Central Sweden. Diss. Royal Inst. of Technology, Stockholm.

Beus, A. A. and Grigoryan, S. V., 1977: Geochemical Exploration Methods for Mineral Deposits.
Applied Publishing Ltd., Wilmette.

Grip, E., 1948: On the occurrence of mercury in Boliden and in some other sulphide deposits in Northern Sweden.
Geol. Surv. Sweden (SGU), Ser. C No.499.

Henriques, Å., Andersson, L.-G. and Arvidsson, S. 1970: Preliminary report to the National Environmental Board, Stockholm.

Hjelmqvist, S. 1964: Geological Map-Kopparbergs län. Geol. Surv. Sweden (SGU), Ser. Ca No. 40.

Lidums, V., 1968: Ångfotometrisk kvicksilveranalys.
Nordiskt symposium kring kvicksilverproblematiken, Lidingö. 93-96.

Lindqvist, L., 1976: SELLO, a fortran IV program for the transformation of skewed distributions to normality. Computers Geosci., 1, 129-145.

Mäkele, K., 1980: Geochemistry and origin of Haveri and Kiipu. Proterozoic strata-bound volcanogenic gold-copper and zinc mineralizations from southwestern Finland. Geol. Surv. Finland. Bull. 310.

Saukov, A. A., 1946: Geokhimiya rtuti. Tr. Inst. Geol. Nauk, Akad. Nauk SSSR 78, Min.-Geokhim. Ser., No. 17.

Sjöstrand, B., 1964: Simultaneous determination of mercury and arsenic in biological and organic materials by activation analysis. Anal. chem. 36, 814-819.

Stock, A., 1934: Die Bestimmung des Quecksilber-Gehaltes der Luft.
Ber. Deut. Chem. Ges. 28, 122-127.

Tegengren, F. R., 1924: Sveriges ädlare malmer och bergverk. Ser. Ca No. 17.

Wedepohl, K. H., 1969-1978: Handbook of Geochemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Wennervirta, H. and Papunen, H., 1974: Heavy metals as lithogeochemical indicators for ore deposits in the Iilinjärvi and Aijala fields, SW-Finland. Geol. Surv. Finland Bull. 269.

Ödman, O. H., 1945: A Nickel-Cobalt-Silver-Mineralization in the Laver Copper Mine, N. Sweden. Geol. Surv. Sweden (SGU), Ser. C, No. 470.

Tabell 1. Suggested threshold values for the Wallin ore and background values from other ores and mines. (Figures except for mercury in parts per million)

Element	Suggested threshold, Wallin ore, Falun	Background						Average Igneous rock (granitic) 7)
		Svärdsjö 1)	Garpen-berg 2)	Tomtebo 3)	Kiipu 4)	Aijala 5)	Iilinjärvi 6)	
Hg[8)]	10					80[9)]	80[9)]	40
Ag	2	0.1	0.5	0.3				0.037
Cu	25	5	10	10	69	20	16	12
Zn	175	10	30	20	125	57	79	51
Pb	50	5	50	13	23	27	25	18
Bi	10	0.1	3	0.3				0.3
Sn	50	1	10					3.0
Ni	40	30	5			12	18	4.5
As	60	1		1		9	14	2.1

1) Andersson et al (1976)

2) Beus & Grigoryan (1977)

3) Selinus (1980, personal comm.)

4) Pyroclastic rocks, geometric mean, 41 samples, from Mäkelä (1980)

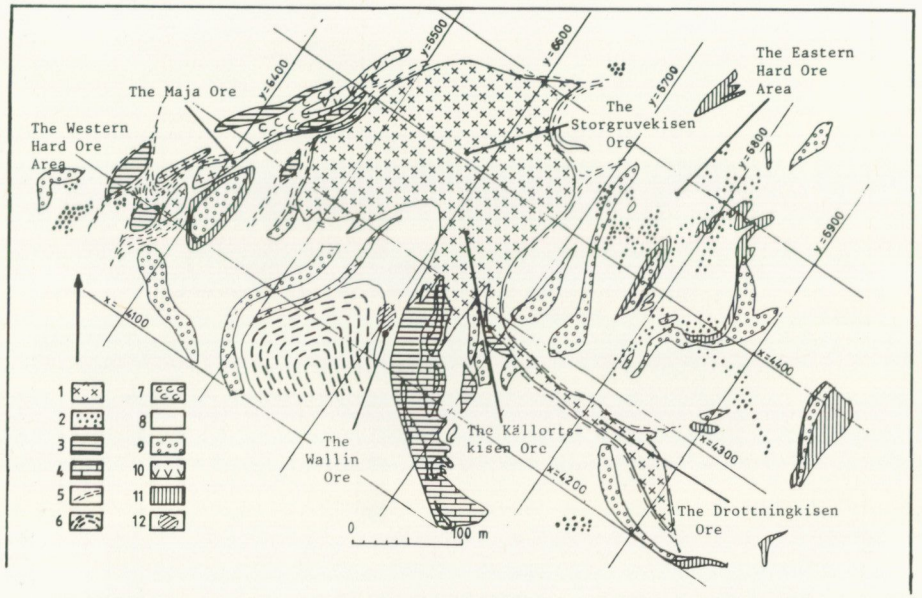
5) Leptite, geometric mean, 266 samples, from Wennervirta & Papunen (1974)

6) Leptite, geometric mean, 43 samples, from Wennervirta & Papunen (1974)

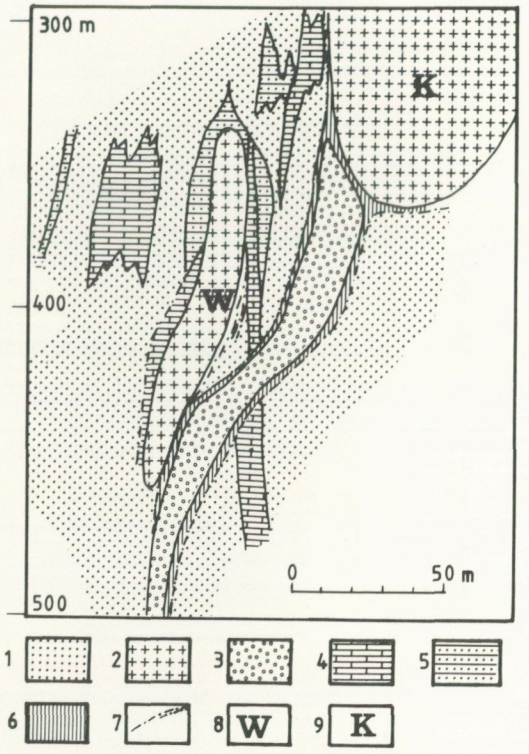
7) Wedepohl (1969 - 1978)

8) ppb

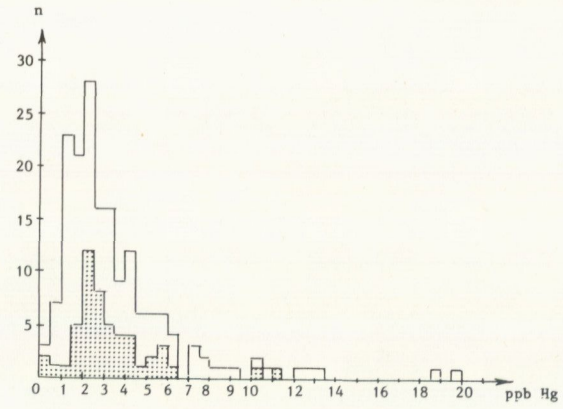
9) The double detection limit is used as a threshold by Wennervirta & Papunen (1974)



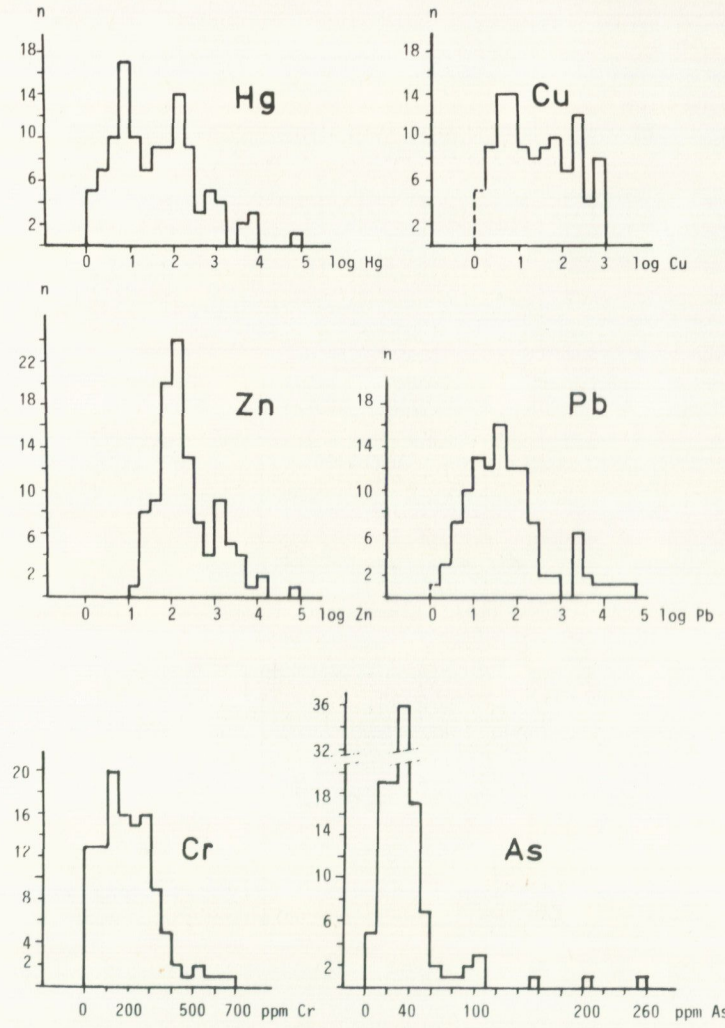
Figur 1 Geology of the Falun Mine between the surface and the 54 metre level (mainly according to Koark, 1960). 1: Pyrite ore. 2: Hard ore. 3: Skarn. 4: Carbonate rock. 5: Sköl. 6: Leptite. 7: Cordierite mica schist. 8: Ore quartzite. 9: Quartz porphyry. 10: Porphyroid. 11: Amphibolite. 12: Location of the Wallin Ore at the 400 metre level.



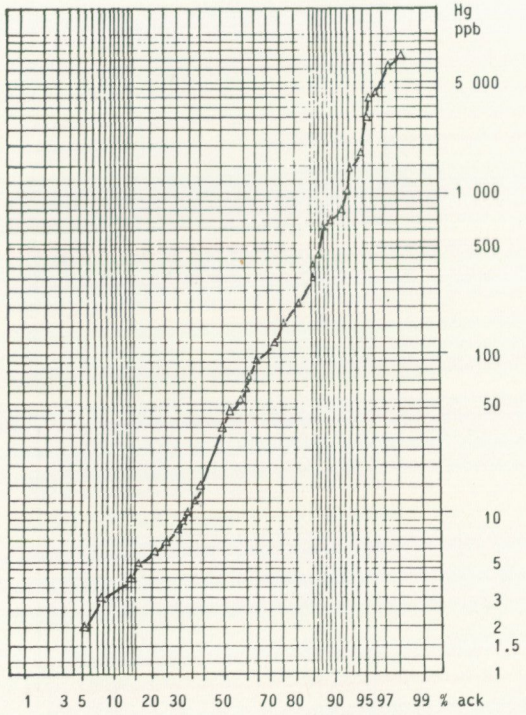
Figur 2 Vertical section through The Wallin Ore and The Källortskisen Ore. 1: Leptite or Quartzite. 2: Ore. 3: Quartz Porphyry. 4: Carbonate Rock. 5: Skarn. 6: Amphibolite. 7: Sköl. 8: The Wallin Ore. 9: The Källortskisen Ore.



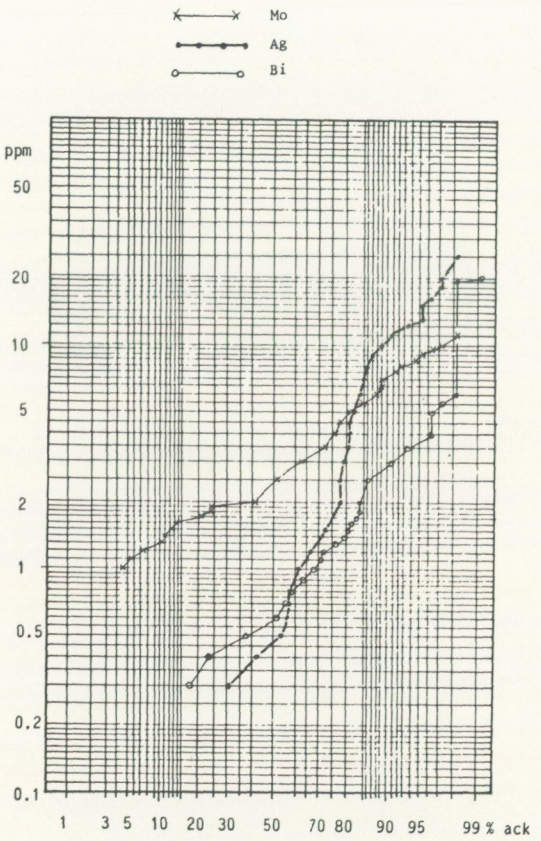
Figur 3 The mercury content of Svecofennian rock in Central Sweden. Values of the leptites are shaded.



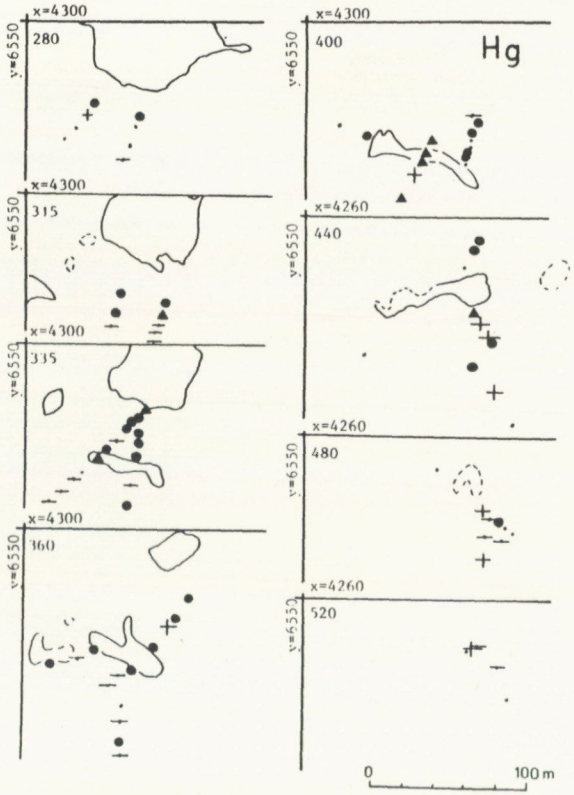
Figur 4 Histograms of elements at the Wallin ore, Falun. Note: log-scale for Hg, Cu, Zn and Pb some outliers are excluded. (Continued on facing page.)



Figur 5 Mercury displayed on logarithmic probability paper.

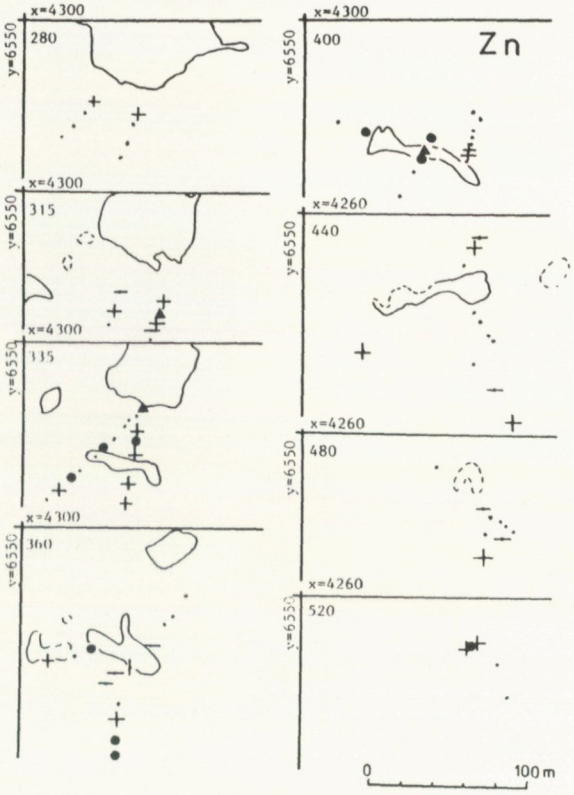


Figur 6 Molybdenum, silver and bismuth displayed on logarithmic probability paper.



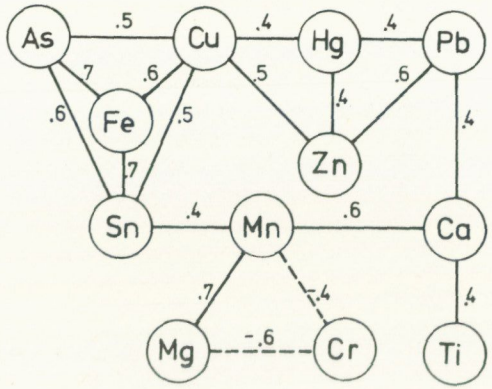
Figur 7 Mercury distribution

- <10 ppb Hg
- 10 - 20 ppb Hg
- 20 - 100 ppb Hg
- 100 - 1 000 ppb Hg
- >1 000 ppb Hg

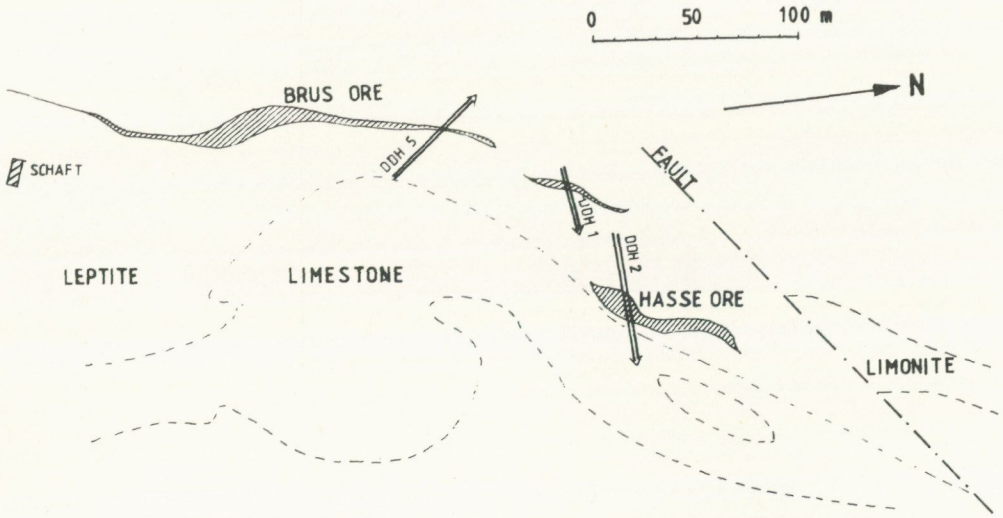


Figur 8 Zinc distribution

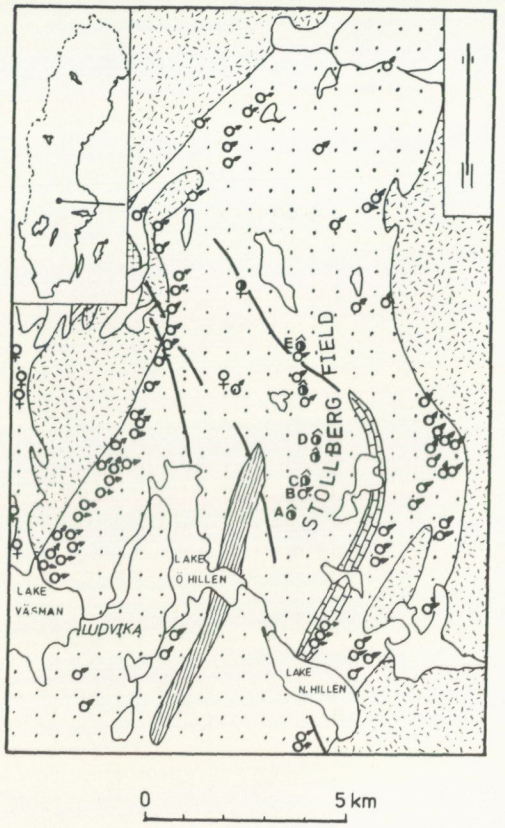
- <175 ppm Zn
- 175 - 350 ppm Zn
- 350 - 1 750 ppm Zn
- 1 750 - 17 500 ppm Zn
- >17 500 ppm Zn



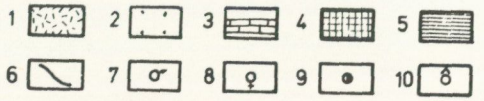
Figur 9 Correlations with r>0.4 and r<-0.4



Figur 11 The southern part of the Stollberg Ore Field at the 270 metre level showing the setting of the Brus and Hasse ore bodies.

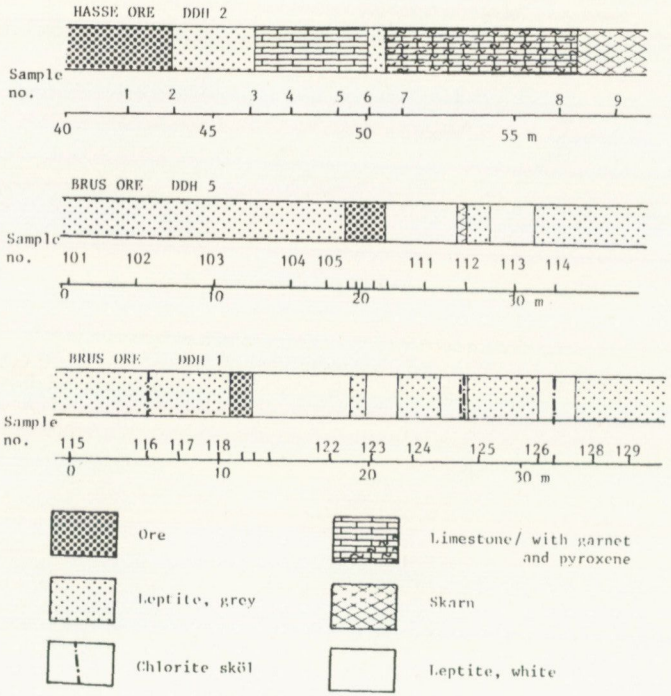


Figur 10 Geology of the Stollberg area (simplified after Hjelmqvist, 1964).

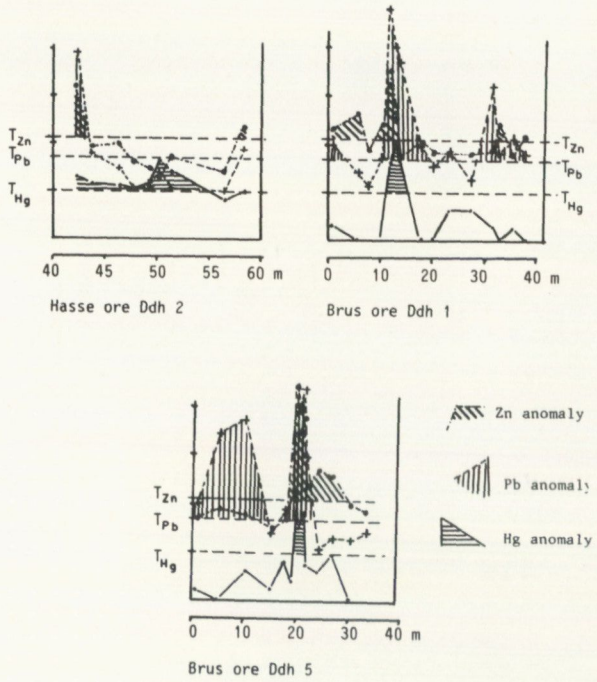


1 Primorogenic granitoid
2 Leptite
3 Limestone
4 Greenstone
5 Greywacke
6 Dolerite
7 Iron ore
8 Pyrite-copper ore
9 Lead ore
10 Zinc ore

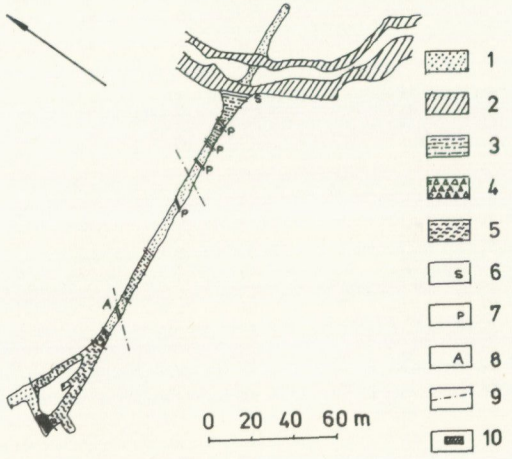
A Hasse and Brus ores
B Limonitic ore
C Stoll ore
D Dammberget ore
E Lustigkulla ore



Figur 12 Sampling points along the diamond drill cores at the Hasse and Brus ores, Stollberg
Note that the cores at the Brus ore (Ddh 1 and Ddh 5) are taken in opposite directions.

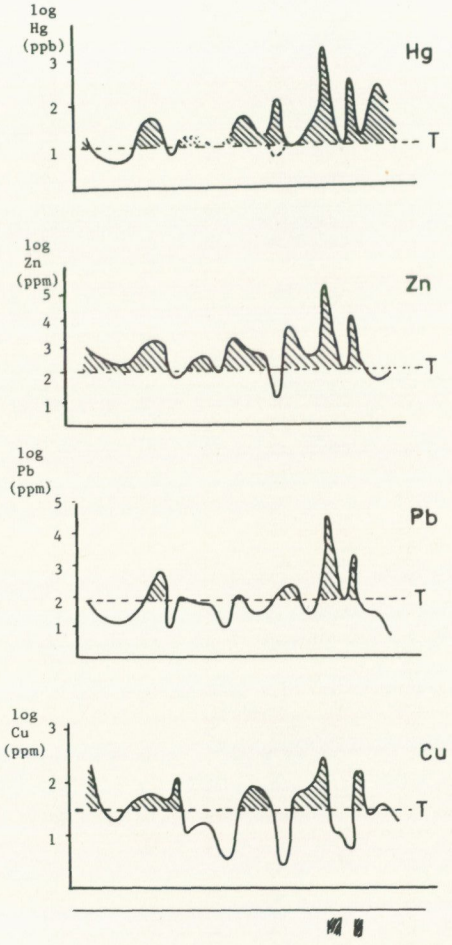


Figur 13 Anomaly pattern at the Hasse and Brus ores with the threshold values of zinc (T_{Zn}), lead (T_{Pb}) and mercury (T_{Hg}) introduced



Figur 14 The geology of the cross-cut at the 500 m level, Zinkgruvan. (See also Figure IV.1)

1: Grey leptite
2: Zinc ore
3: Skarnbanded leptite
4: Grey leptite with disseminations of pyrrhotite
5: Grey veined gneiss
6: Skarn
7: Pegmatite
8: Amphibolite
9: Fault
10: Shaft



Figur 15 Anomaly pattern of mercury, zinc, lead and copper at the 500 m level cross-cut.

Kvicksilver som malmindikator vid prospektering.

Lennart Widenfalk
Avd för Ekonomisk Geologi
Högskolan i Luleå

Alltsedan Saukov (1946) påvisade de intressanta dragen i Kvicksilvers geokemi har metallen tilldragit sig uppmärksamhet världen över som ett prospekteringshjälpmedel och malmindikator. I Sverige bilades vid KTH en grupp under Åke Henriques och under detta symposium har en av gruppmedlemmarna, Sven Arvidsson visat en del av sina resultat.

Det som utmärker kvicksilver och som gör den intressant är dels att metallen följer med nästan alla typer av sulfidmalmer och dels att den är mycket mobil. Kvicksilver uppvisar stora geokemiska likheter med zink och bildar en fast lösning i zinkblände. Detta mineral kan sägas vara den mest stabila kvicksilverföreningen. Karaktäristiskt för alla Hg-haltiga sulfider är att låga halter av Hg-ånga avgår genom diffusion även vid mycket låga temperaturer ("geologiskt sett") även om det krävs flera hundra grader för att frigöra all kvicksilver (ca 700 ^{o}C för ZnS).

Detta uppträdande av Hg innebär att metallen kan utnyttjas på två sätt: dels kan man utnyttja den som spårelement och analysera den i sulfider och dels kan den"sniffas" där den avgångas från sulfiderna.

Sniffning av Hg-ånga har länge praktiserats bl.a. i Canada (Barringer) och försök pågår förnärvarande även i Sverige (L.Malmqvist, Boliden, PersCom)

De undersökningar jag hittills genomfört i Skellefteområdet visar att Hg är användbar vid geokemiskt arbete genom att analysera halterna i sulfider.

Hg i zinkblände och andra sulfider ökar uppåt i stratigrafin bland Skellefteområdets malmer men ökar även regionalt mot öster (Widenfalk, 1979). Kvicksilverhalterna är vidare mycket karaktäristiska för varje sulfidmalm och

kan användas för att avgöra om malmblock kan komma från en redan känd fyndighet eller ej (Widenfalk & Håkansson, 1983).

Skelleftefältet har liksom all annan berggrund genomgått en metamorfos, och detta avspeglar sig även i olika mineraljämvikter. Vid låga metamorfosgrader finns relativt mycket Hg i alla sulfider men vid ökande temperaturer avångas kvicksilver snabbare från andra sulfider än zinkblände. Kvoten Hg / Zn i zinkblände genom Hg / Cu i kopparkis är ca 3 (1 - 4) för det egentliga Skelleftefältet (ung.grönskifferfacies) medan Adak området har en kvot på ca 14 (ung.amfibolitfacies). Hg halterna i sulfiderna kan alltså användas som en indikator på metamorfosgrader (Widenfalk, 1979).

Under metamorfosen av Skelleftefältets malmer skedde även tektoniska rörelser och malmerna blev brantstående. Den uppvärmning som då skedde medförde en avgång av Hg-ånga som fick till följd att malmernas lägre delar har lägre halter av Hg än de övre (Widenfalk, 1983). Redan under den diagenetiska processen avångades kvicksilver från malmerna och en viss anrikning av Hg i sulfider kan spåras stratigrafiskt rakt ovan malmerna. Dessa processer har sålunda medfört att utanför Skelleftefältets malmer finns en kvicksilverhalo både både geodetiskt och stratigrafiskt ovanför. Denna halo torde kunna användas i lokalt prospekteringsarbete.

Litteratur:

Saukov, A.A.: "Kvicksilvers Geokemi", "Sojetunionens Vetenskapsakademi - Institutet för Geologi"," Mineralogisk - geokemiska serien no 17" , 1946. (På ryska)

Widenfalk, L.: Mercury as an indicator of stratigraphy and metamorphism in the Skellefte ore district. Econ. Geol. Vol 74, 1979, pp 1307-1314.

Widenfalk, L.: Mercury zoning in the Långsele and Kankberg ore bodies. GFF vol 105:1, 1983, (in press)

Widenfalk, L. and Håkansson, S.: Mercury, an indicator of sources of ore-bearing boulders. GFF, Vol 105:2, 1983 (in press)

GEOKEMI I VÄSTERBOTTENS URBERG

Uno Svensson
Boliden Mineral AB
936 00 Boliden

Föredraget behandlar de dominerande bergarterna i Västerbottens urberg. Huvudelementen i fylliter, gnejser, Revsundsgranit och vulkanitseriens bergarter finns redovisade i SGU Ser C nr 652 och spårelementen i SGU Ser C nr 764. Intresserade hänvisas till dessa skrifter.

En fortsatt undersökning av bergarter i Västerbotten har skett och riktas mot Jörngranitmassivet och den gnejs som finns söder om Skellefteälvens nedre lopp. Den senare har tolkats som Jörngranitmigmatit.

På vardera av dessa bergarter har tagits över 100 prover, vilke analyserats på huvudelement och spårelement. Det egentliga Jörngranitmassivet har också detaljkarterats.

Geokemiskt skiljer sig den undersökta gnejsen söder om Skellefteälven oväsentligt från den längre söderut befintliga ådergnejsen. Det synes enbart vara strukturen som skiljer de två gnejserna. Den s k Jörngranitmigmatiten utgöres av en finstrimmig grå gnejs.

Jörngranitmassivet består av en differentiationsserie av eruptivbergarter. Jämförd med Revsundsgranitseriens bergarter finns det mera av basiska bergarter i Jörngranitserien. Något skiljer sig också graniterna i fältspatsammansättningen i det att Revsundsgraniten är kalidominant och Jörngraniten natriumdominant. Beräkningarna är gjorda enligt T.F.W. Barth, Journal of Geology 1955, plansch 1 och 2.

Större olikheter finns i spårelementen. Detta framgår av den visade sammansättningen, tabell 1. Av intresse i Jörngraniten är de höga kopparhalterna. På några ställen uppnås i det närmaste brytvärda halter. Revsundsgraniten har lägre kopparhalter och något område i den med anrikning av koppar är inte känt. I Jörngraniten är blyhalterna väsentligt lägre än i Revsundsgraniten. Detta är kanske i linje med de högre kalihalterna i Revsundsgraniten. I eruptivbergarter ingår bly och kalium i samma elementassociation. Jörngranitmassivet utgör en svavelfattig provins i motsats till Revsundsgraniten och hela den serie av bergarter som har givit upphov till Revsundsgraniten.

Analysmaterialet från Jörngraniten har bearbetats med faktoranalys på samma sätt som Revsundsgraniten och de andra bergarterna i Västerbottens urberg. Resultatet blev emellertid annorlunda. En mycket stor del av variationerna (laddningen) samlades i en enda faktor och i den ingick kiselsyra (SiO_2). Denna faktor kunder användas vid uppritning av de olika bergarterna jämsides med den geologiska karteringen. Det var faktoranalysens "factor scores" som användes.

Orsaken till att faktoranalysen gav detta resultat är att sviten innehåller bergarter alltifrån gabbro till sura graniter. Det är då naturligt att det är kiselsyran som har största variationen.

Det skulle ha varit möjligt att dela upp analyserna i två grupper, sura och basiska, för att få en större jämvikt i variationen i olika faktorer.

Det resultat som kom fram genom den geokemiska undersökningen liksom även av den geologiska karteringen är kartbilden över Jörngranitmassivet, pl 3. De centrala delarna av Jörngranitmassivet består av jämnkorniga gråa sura graniter och denna del är mycket homogen. I en krans runt hela massivet finns dels en inre och dels en yttre zon av basiska bergarter alltifrån basisk granit till gabbro. Mellan de två zonerna finns oregelbundna inslag av sur granit som liknar den i det centrala partiet. Det är i den yttre delen som sulfidimpregnationer och höga kopparhalter har påträffats. I sådana områden kan bergarterna vara något metasomatiskt omvandlade.

Av kartbilden får man den uppfattningen att Jörngranitmassivet är bildat under olika intrusionsfaser. Den första, som kan vara sammansatt av flera delfaser, skulle ha åstadkommit den differentierade berggrund som nu finns i ytterområdena till massivet. Den andra skulle ha brutit upp som en dom inne i den äldre och lämnat kvar en krans. Den inre domen består enbart av sur grå granit.

Åldersskillnaden mellan de två delarna behöver inte vara betydande. Det är troligt att processerna har skett i en direkt följd på samma sätt som dombildningen i andra granitområden.

Vid den geologiska karteringen av Jörngraniten har geokemin utgjort en komplettering i många delar och i andra givit samma resultat som hällkarteringen. Det förefaller orationellt att bygga upp en geologisk bild enbart på geokemiska undersökningar.

Det som här sägs om geokemins förhållande till den geologiska karteringen kan tas som kritik av den tidigare undersökningen i Västerbotten, särskilt den delen som behandlar fylliter, gnejser och Revsundsgranit. Undersökningen gjordes utan en geologisk revidering av den gamla kartbilden. Det förutsattes att bergarterna i hela området var enhetliga. Underlaget till tanken att analyserna av fylliterna skulle visa den ursprungliga sammansättningen och att analyserna av gnejserna och Revsundsgraniten skulle visa vilka elementutbyten som metamorfosen innebar var således inte klart. Genom de prospekteringskampanjer som bedrivits under senaste tiden för att hitta volfram, tenn och molybdenmineraliseringar har en annan mera komplicerad bild av Västerbottens geologi framkommit. Det visar sig att en omfattande dombildning förekommit. I kontakterna till domerna har anrikningar av de eftersökta elementen skett. Anrikningen finns både i graniten i en greisenzon och i sedimenten utanför där skarnbildning uppträder. Genom samma process torde även andra element ha anrikats i fylliten än de genom prospekteringen eftersökta. Det har genom dessa undersökningar dessutom kommit fram att Revsundsgraniten inte är så enhetlig som antagits utan att den finns i flera olika varianter. Detta antyder de variationsdiagram som har redovisats. I stort torde emellertid resultatet av den geokemiska undersökningen av fylliten, gnejser och Revsundsgranit i Västerbottens urberg vara riktigt.

Det visas en skiss över domstrukturer i trakten av Åsele, plansch 4. Sådana strukturer finns i stora delar av Västerbottens urberg utom i Skelleftefältet där en annan typ av tektonik är förhärskande. Berggrunden där är isoklinalveckad vilket är typiskt för subductionzoner. En annan liknande zon finns i norra Västernorrland.

Sensmoral: Geokemiska undersökningar skall ske enbart när geologin är utredd.

Tabell 1. Geokemisk analys av Jörngraniten

Element	Medel-halt	Stand avv	Varia koff	Skevhet	Toppig-het	Medel-halt Revsunds-graniten
SiO_2	69,1 %	5,8	0,08	-1,3	1,8	69,7
TiO_2	0,4	0,2	0,6	2,5	8,1	0,3
Al_2O_3	15,0	1,5	0,1	0,2	0,3	14,3
Fe_2O_3	1,5	0,8	0,5	1,5	2,7	0,6
FeO	2,2	1,6	0,7	0,8	0,2	3,0
MgO	1,4	1,5	1,1	3,2	11,3	0,8
CaO	3,2	2,0	0,6	1,3	2,3	2,0
Na_2O	3,4	0,9	0,3	-0,1	0,1	3,0
K_2O	2,5	1,5	0,6	0,3	-1,2	4,3
Ba	591 ppm	260	0,4	0,5	1,7	805
Cl	60	75	1,3	2,8	9,4	-
Cr	53	100	1,9	8,1	73,6	<20
Cu	29,2	52	1,8	4,0	19,1	13,6
Ga	19	3,0	0,2	0,4	-0,6	22
Ce	1,5	0,6	0,4	2,8	12,3	1,2
Mn	586	300	0,5	1,0	0,7	421
P	475	382	0,8	2,7	9,5	-
Pb	12,8	5,9	0,5	0,6	-0,2	31,7
Sr	328	292	0,9	2,2	5,4	264
Zn	58	32	0,5	1,2	1,6	95
S	0,02%	2,2	1,1	2,9	9,3	0,11
Glöd förl	0,9	0,8	0,8	2,6	8,5	-
D	2,68	0,08	0,03	1,1	1,5	2,68

Beräkningarna har gjorts enligt följande formler.

Medelhalter $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$

Standardavvikelser $s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$

Variationskoefficient $C = \frac{s}{\bar{x}}$

Skevhet = Snedhet $= \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^3 \Big/ \left[\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2\right]^{3/2}$

Excess = Toppighet $= \left[\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^4 \Big/ \left[\frac{1}{n}(x_i - \bar{x})^2\right]^2\right] - 3$

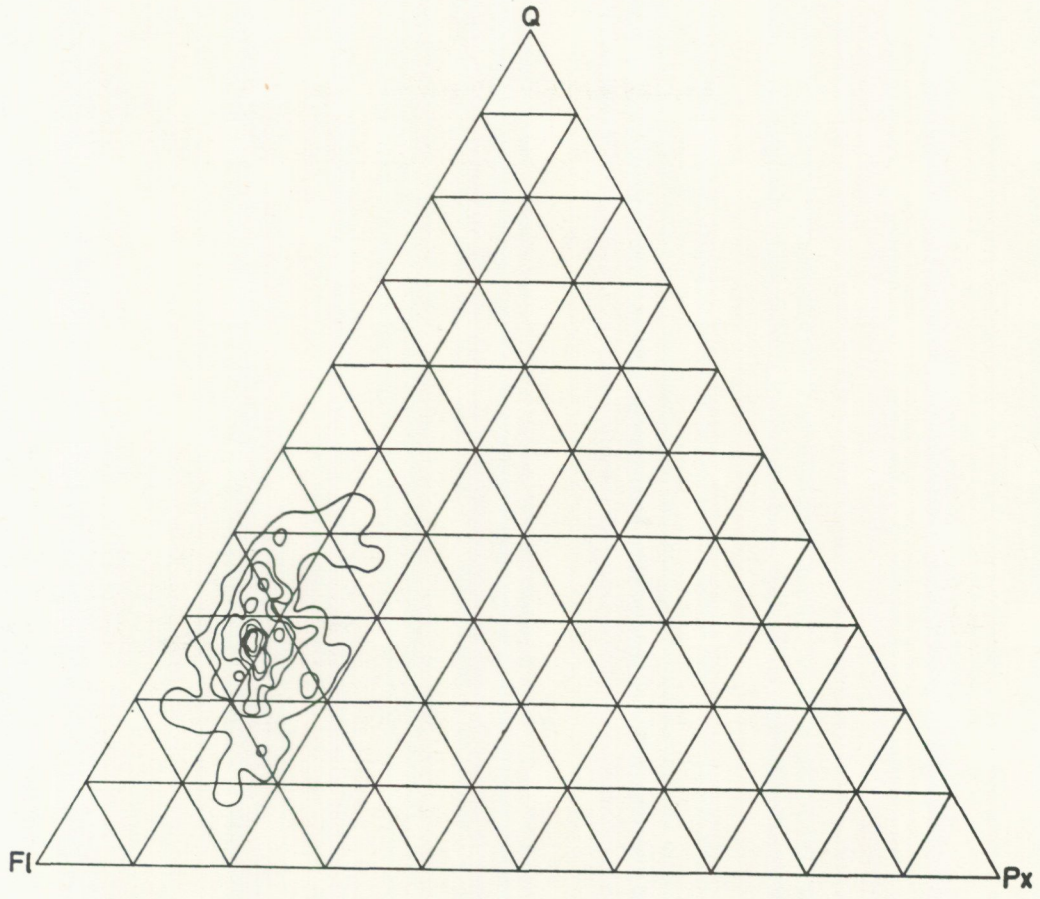


Fig. 8. Diagram of mineral composition in the Revsund granites

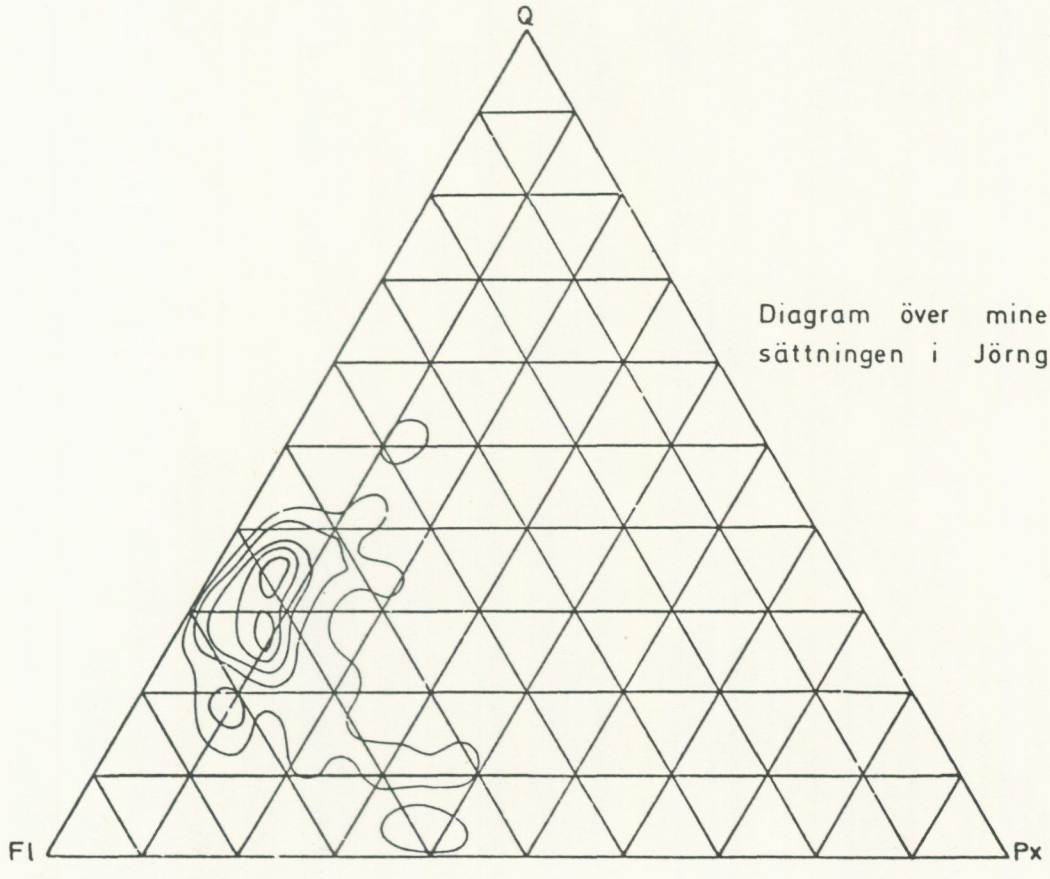


Diagram över mineralsammansättningen i Jörngraniten

PL 1

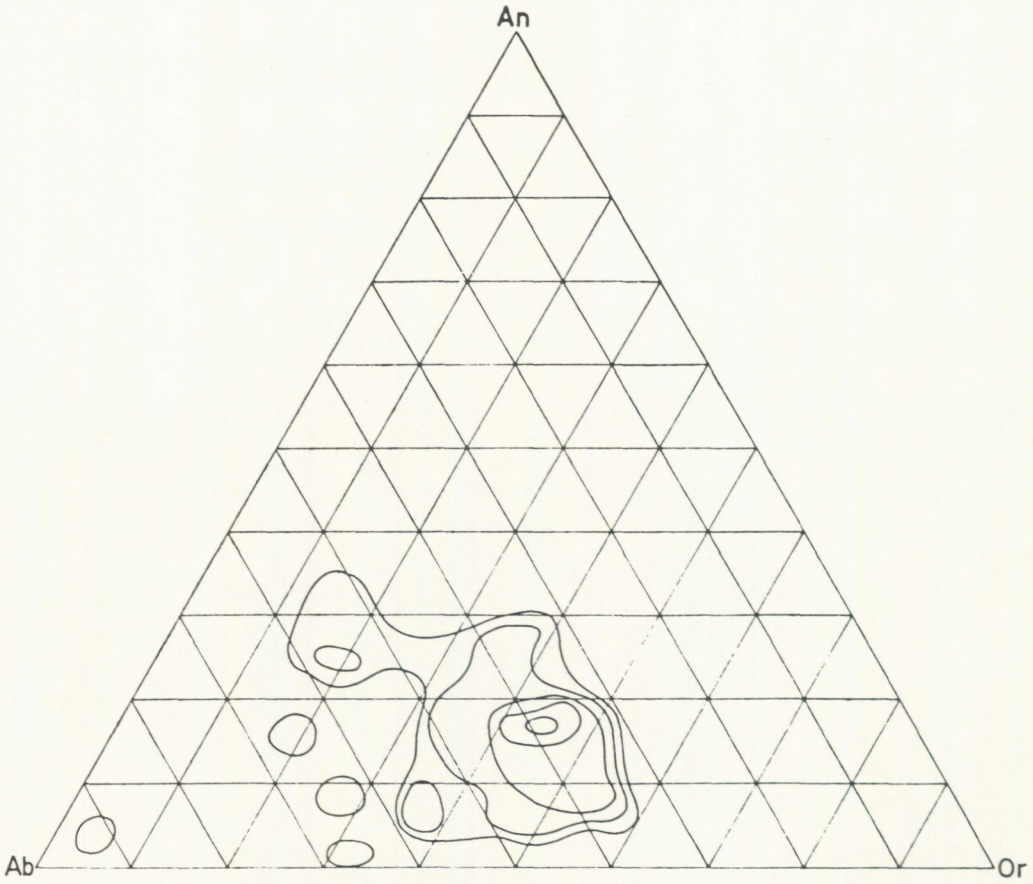
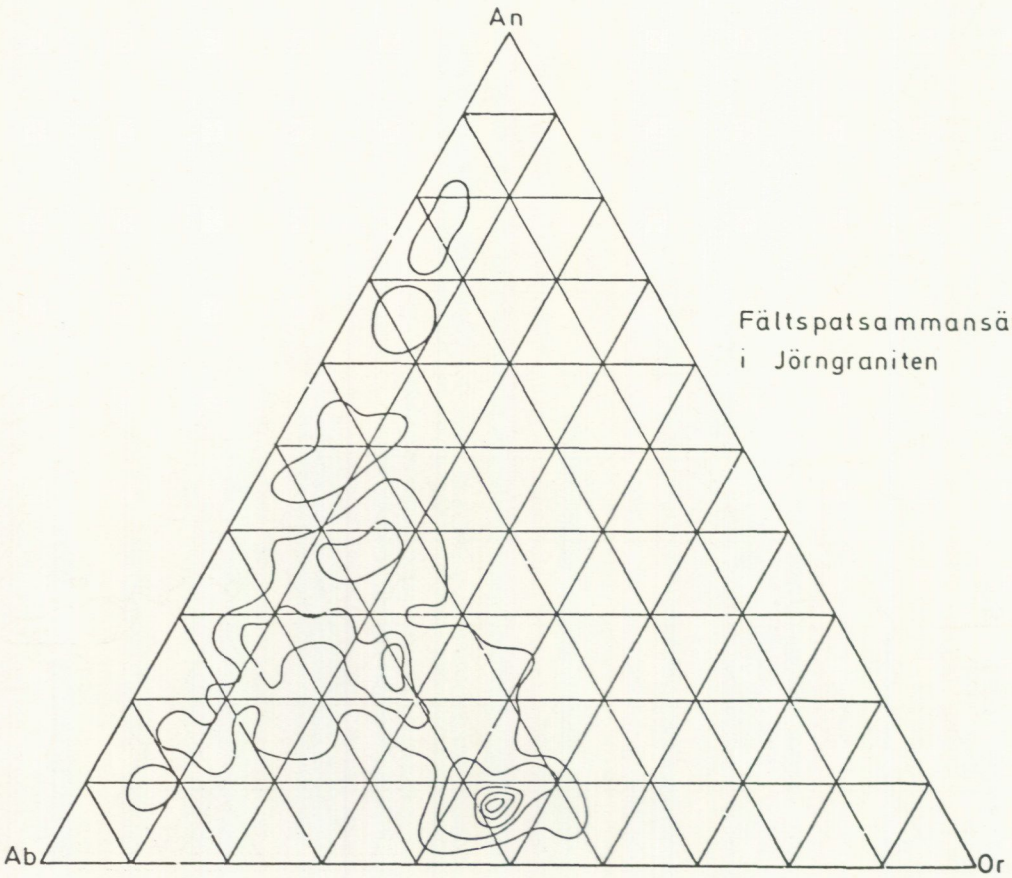
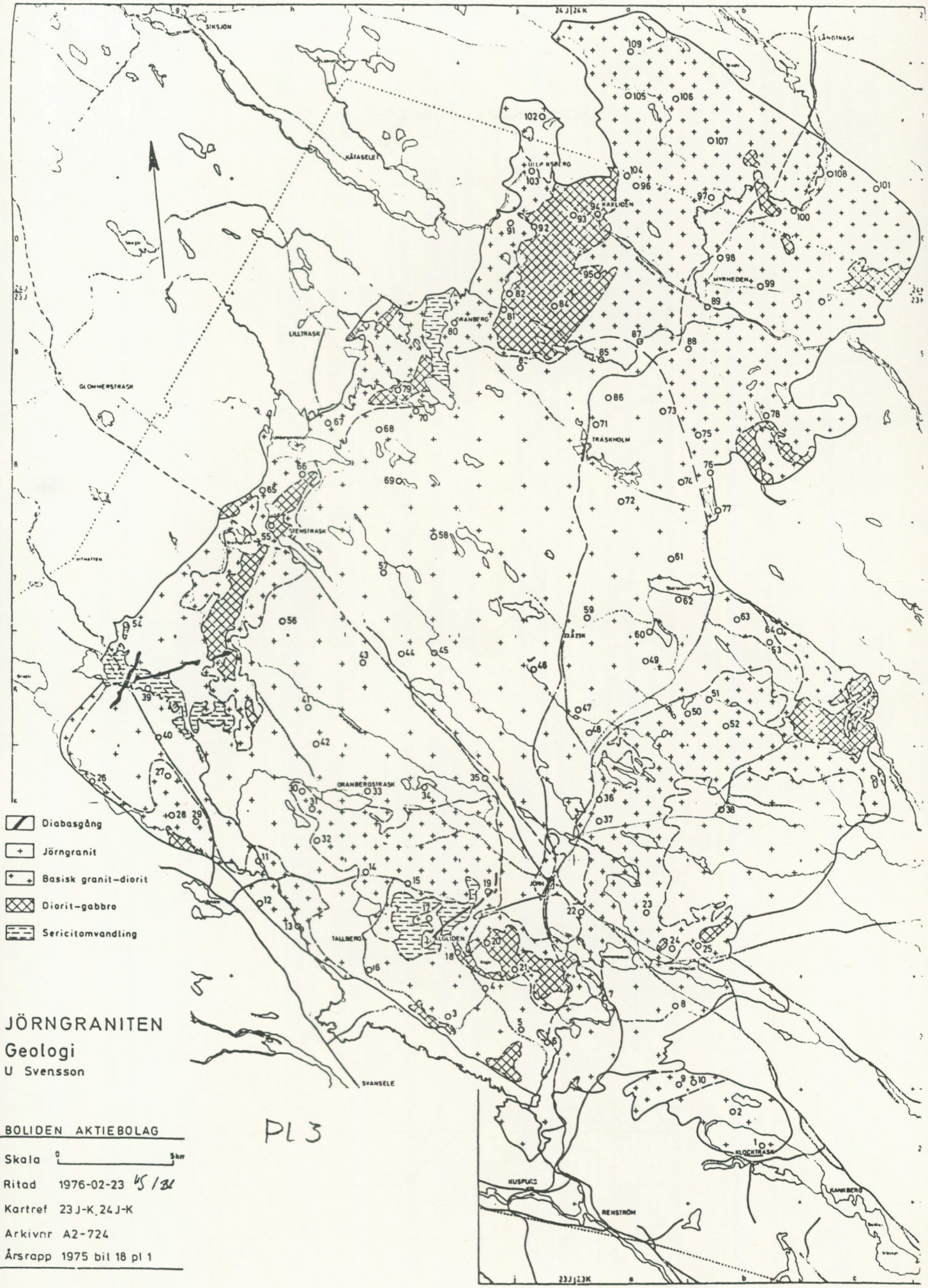


Fig. 13. Diagram of feldspar composition in the Revsund granites



Pl 2


Diabasgång
Jörngranit
Basisk granit–diorit
Diorit–gabbro
Sericitomvandling
JÖRNGRANITEN
Geologi
U Svensson
BOLIDEN AKTIEBOLAG
Skala 0 5km
Ritad 1976-02-23 45/31
Kartref 23J-K, 24J-K
Arkivnr A2-724
Årsrapp 1975 bil 18 pl 1
PL 3
SIKSJON
LÅNGTRASK
RÅTASELET
LILLTRASK
GLOMMERSTRASK
GRANBERG
MYRHEDEN
TRÄSKHOLM
STENSTRASK
GRANBERGSTRASK
TALLBERG
ÄLGLIDEN
JÖRN
SVANSELE
KUSPUKS
RENSTRÖM
KANKBERG
KLOCKTRASK


Naversjöberget
Rosendal
Rödkullan
Gigån
Flakarset
Rismyran
Växansjö
Spillersjön
Spillersberget
Pilsjön
Falmyran
Vastansjön
Stormyran
Gardsjön
Trehörningen
Vaksjön
Stugusjö
Loggasjön
Kukarberg
N.Insjö
S.Insjö
Insjön
Gransjön
Kullmyran
Stor-Skarpsjön
Kalmyran
Gammelbrannan
Nasberget
Siksjö
Siksjön
Stennäs
Gannsjön
Granberget
Svartberget
Fabodtjärnen
Lillberget
Fabodtjärnbacken
Flatbrannan
Arrmyran
Arrmyrbacken
Stormyr
Brännmyr
Orrvinkullen
Vaxsjön
Kvalmyran
Kullsjön
Snorstarrberget
Stor-Valvattnet
Lill-Valvattnet
Lövberget
Granberget
Lavberget
Hemberget
Granåsen
Norrsjön
Algsjön
Tallberget
Soderberg
Gravtjärnen
Hundtjärnen
Dammtjärnen
Tjesjön
Orgsjöberget
Ålandet
Älgsjön
Orgsjön
Orgnäs
Borgsjön
Bodvikberget
Svarthacken
Bomsjön
Bomsjöberget
Åsele
Kalberget
Gigsele
Gigtaberget
Brandbarberget
Gammelgårdsberget
Västra-Storsjön
Storsjön
Öster-Storsjön
Stensjön
Stensjöliden
Kebbeberget
Nordanstjöberget
Dalsjöberget
Oxvattnet
Abborrsjön
Kvällträsk
Kvällträskberget
Slensjön
Bladtjärnen
N.Idvattensjön
Borgholm
Rågsjön
Rågsjöberget
Bergvattensjön
Bergvattenberget
Östernäset
Östernäs
Idvattensjön
Hemberget
Norrsjöberget
Norrsjön
Vispsjön
Mossavattnet
Logdagstjärnberget
Betsarn
Österstrand
Pl 4

GEOKEMI I FAST KLYFT - EN SAMMANFATTNING AV BOLIDENS UNDERSÖKNINGAR

H. Zweifel
Boliden Mineral AB
93050 Boliden

Boliden har gjort undersökningar av geokemi i fast klyft i och omkring följande fyndigheter:

Boliden, Renström, Kimheden, Kristineberg, Svärdsjö, Garpenberg och Ljusnarsberg.

Den första insatsen (antagligen också den första i Sverige) var undersökningen av Bolidenmalmen i början på 60-talet. (Nilsson C.A., 1938: Wall rock alteration at the Boliden Deposit, Sweden, Econ. Geol. 63, 472-494).

En del undersökningar gjordes i samarbete med institutionen IMGRE i Moskva som då också analyserade proverna. Här skall endast redovisas några exempel där hela grundmaterialet har stått till vårt förfogande. Dessa exempel är valda för att ge ett visst underlag för att diskutera olikheter mellan olika fyndigheter och geologiska miljöer.

1. BOLIDEN

Boliden var den första fyndigheten som undersöktes av C A Nilsson. I Economic Geology redovisar han endast omvandlingszonerna samt huvudelementen och inte resultatet av spårelementundersökningen.

Denna undersökning visar att de primära vulkaniterna har omvandlats till klorit-sericitskiffer, sericitkvartsit, med eller utan pyrit, samt andalusit-sericitförande bergarter.

Omvandlingszonen tilltar under den kompakta malmen och blir på 500 m nivå över 300 m bred. Andalusitfels uppträder i omvandlingszonens centrum under den massiva malmen.

Vad spårelement beträffar, så är det av intresse att notera att vismuthalterna är mycket höga, framför allt i mitten av omvandlingszonen, i samband med analusitfels och sericitskiffer (upp till >20 ppm). As visar höga halter i större delen av omvandlingszonen, däremot är Zn koncentretat till de mer perifiera delarna. Kopparhalterna är flera gånger bakgrunden, frånsett omvandlingscentrum. Sammanfattningsvis kan man alltså konstatera att det uppträder en kraftig och mot djupet tilltagande omvandlingszon med höga halter av spårelement i samband med Bolidenmalmen. Det stämmer överens med den geologiska tolkningen att malmen är lokaliserad i den övre delen av en vulkanisk pipe.

2. RENSTRÖM
(Se STU-rapport 74-3301)

Undersökningen av spårelementfördelningen har begränsats till Renström Västra-fyndigheten som i de övre delarna består av malmkropparna A och B, vilka nedanför 500 m nivån går över i varandra via ett område med lägre halter.

Följande olika malmtyper förekommer:

1. Bandad kompakt zink-svavelkismalm (något kopparkis).

2. Kompakt zinkmalm.

3. Kompakt zink-blymalm.

4. Kompakt koppar-svavelkismalm.

5. Zinkimpregnationsmalm.

6. Kopparimpregnationsmalm.

I princip uppträder de ofta bandade zinkmalmerna i gruvans övre och norra delar, kopparimpregnationsmalmerna uppträder från 400 m mot S och mot djupet. Malmerna ligger geologiskt i en miljö med tuffer, skiffrar och kalkiga sediment, men även grovpyroklastiska bergarter. Malmerna och sidoberget är kraftigt veckade.

Resultatet av den geokemiska undersökningen kan sammanfattas enligt följande:

1. Anomala halter förekommer i en mycket begränsad zon utanför malmerna eller mineraliseringarna. I många snitt är de geokemiskt anomala halterna begränsade till ett fåtal meter.

2. Anomaliernas bredd avtar från området med kopparimpregnationer mot zinkmalmsdelen.

3. Zn, Cu och Ba har de största aureolerna. Särskilt Ba har vissa anomala halter betydligt längre från malmen än andra element.

4. Element som Cu, Ni och Bi förekommer ännu mera begränsat till ett fåtal meter utanför malmerna.

5. Faktoranalysen visar en intim koppling mellan Zn-Pb-Ag liksom mellan Cu-Bi-Mo-Sn.

6. Någon tydlig tendens att vissa element skulle vara anrikade i aureolens nedre eller övre del har inte observerats. Vissa sådana trender sammanfaller dock med riktningen av gränszonen mellan kopparimpregnationsmalm och zinkmalm.

7. Elementfördelningen och anomaliernas obetydliga utbredning, framför allt omkring zinkmalmerna, kan förklaras av att dessa har utfällts och avlagrats och att kopparmalmer förekommer inom en mindre begränsad tillförselkanal i utkanten av ett större aktivt vulkanitområde.

3. KIMHEDEN

Kimhedenfyndigheten ligger inom Kristinebergsantiklinalens norra delar. Sidoberget består av omvandlade vulkaniter som nu förekommer som kloritkvartsiter, kloritskiffer och kloritsericitkvartsit.

Två malmkroppar kan urskiljas, nämligen kopparimpregnationsmalmer och kompakta svavelkislinser med ofta låga kopparhalter. Zinkhalterna är låga (i genomsnitt omkring 0,10 % Zn) liksom ädelmetallhalterna. Spårelementen i malmens omedelbara närhet visar relativt obetydliga förhöjningar jämfört med den allmänna bakgrunden (Zn t ex 200-400 ppm mot en bakgrund av 110 i Skelleftefältet). Sådan förhöjning förekommer bara ett fåtal meter utanför malmlinserna, enbart Cu visar en något bredare aureol, upp till 12 m utanför malmen (men Kimheden är ju i princip en kopparimpregnationsmalm, så gränsen mellan kopparmineralisering och förhöjda halter är flytande).

Den smala zonen med förhöjda halter fortsätter neråt under malmen så långt den har kunnat följas genom borrhålsobservationer (ca 100 m). Utanför de direkt intill malmlinserna liggande anomalierna förekommer en zon med mycket låga halter av spårelement enligt följande tabell:

Zn g/t	Pb g/t	Cu g/t	As g/t	Bi g/t	Ga g/t	Ag g/t	Ge g/t	Ba g/t
13	5	10	<3	<0,5	17	<0,3	0,5	1240

Detta skall jämföras med genomsnittshalterna i Skelleftefältet enligt U Svensson:

Zn g/t	Pb g/t	Cu g/t	As g/t	Bi g/t	Ga g/t	As g/t	Ge g/t	Ba g/t
110	9	36	8	0,4	15	<0,5	0,8	560

Denna sammanställning visar att halterna av alla element, utom Ba, är betydligt lägre än Skelleftefältets bakgrund. Det här förhållandet är en allmän tendens i Kristinebergsfältet, som har låga bakgrundshalter, men halterna i Kimhedens yttre aureol är dessutom lägre än genomsnittet i Kristineberg. Följande tabell ger en översikt beträffande elementhalterna i Kristinebergsfältet.

Zn g/t	Pb g/t	Cu g/t	As g/t	Bi g/t	Ga g/t	Ag g/t	Ge g/t	Ba g/t
56	11	20	5	<0,3	16	<0,3	0,6	1000

Vi kan alltså konstatera en urlakning av nästan alla spårelement i Kristinebergsantiklinalen och dessutom ytterligare en accentuerad urlakning i Kimhedens yttre omvandlingszon. Vi kan här inte närmare gå in på att förklara dessa fakta, men det är möjligt att vi här har att göra med en urlakning av de omgivande bergarterna genom konvektionsströmmar under ett tidigt stadium av vulkanismen och sedimentationen (pretektonisk, premetamorf).

Det är också tänkbart att de urlakade elementen åtminstone delvis har bidragit till malmbildningen i området.

4. SVÄRDSJÖ
(Se STU-rapport 74-5301)

Svärdsjömalmen ligger inom en serie av sura vulkaniter (leptiter) i direkt anslutning till ett kalkstens-dolomitstråk, ofta omvandlat till skarn. Malmerna uppträder som isolerade linser och har följande dimensioner:

Mäktighet 1-30 m
Längd 50-100 m
Djup 100->300 m

Malmmineral är zinkblände, blyglans, kopparkis, svavelkis, magnetkis och magnetit.

Malmerna är stratabundna och uppträder inom kalk- och skarnstråken. De har veckats tillsammans med omgivningen och deras nuvarande form är en produkt av den tektoniska deformationen. Resultatet av den geokemiska undersökningen kan sammanfattas i följande punkter.

1. Det förekommer inte någon framträdande vertikalzonering inom aureolen i Svärdsjö.

2. Det finns förändringar av elementsammansättningen och elementkvoterna i horisontell riktning från E mot W.

3. I sidled, tvärs över malmlinserna, är de anomala halterna begränsade till en zon som i allmänhet ej överstiger 15 m.

4. Hela det anomala stråket är flera 100 m långt, men man kan inte relatera de enstaka linserna till vissa typer av anomalier. Det är också problematiskt att definiera en anomali då hela skarnomvandlingen visar anomala halter.

5. Korrelationsmatrixen visar framträdande korrelationer mellan Pb och Zn, Cu och Ag samt mellan As och Sn.

6. Produktivitetskvoter har beräknats enligt IMGRE-metodiken (se STU-rapport 74-3301). Metodiken har inte bidragit till någon större förståelse av de geokemiska resultaten. Sådana kvoter används enligt IMGRE för att bestämma om man befinner sig ovanför eller under en malm. En hög kvot av typen $\frac{ZnxPbxAg}{CuxCoxBi}$ skulle då betyda att man befinner sig ovanför en malmlins. Synliga Pb-Zn-mineraliseringar uppträder i direkt anslutning till de massiva malmlinserna och det är självklart att man då får höga halter i täljare och därmed en hög kvot.

5. SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

Ur den här korta beskrivningen kan vi dra slutsatserna att elementfördelningen är beroende av malmtyp och geologisk miljö.

Vi har satt följande exempel:

Boliden

En bred och kraftig omvandlingszon med höga halter av bl a Bi, As, Mo och Cu under malmen. Många faktorer tyder på att vi befinner oss geologiskt inom en pipezon.

Reström

En aureol där de förhöjda elementhalterna är begränsade till ett fåtal meter utanför de ofta bandade zinkmalmerna. Geologiskt befinner vi oss i en miljö där zink-blymalmer har sedimenterats i små bassänger. Kopparimpregnationsmalmen representerar antagligen en begränsad tillförselzon i utkanten av ett aktivt vulkaniskt centrum.

Kimheden

En mycket begränsad zon med svagt förhöjda halter ett fåtal meter utanför malmen och därefter spårelementhalter som ligger under bakgrunden. Vi har alltså en regional urlakning som ev har med konvektionsströmmar att göra som cirkulerade under den aktiva vulkaniska perioden och sedimentationen.

Svärdsjö

En begränsad zon med förhöjda halter av spårelement, delvis direkt i anslutning till skarnbildningen. Geologiskt antagligen en distal malmbildning med kraftiga sekundära omflyttningar.

Någon enkel modell som skulle kunna användas för dessa fyra sulfidmalmer har inte kunnat konstateras. Även om den geologiska miljön i stort är likartad (sulfidmalmsbildning i vulkanisk-sedimentär miljö) så är de lokala geologiska förhållandena så olika att det bildas olika mönster. Någon enkel schematisk "upp och ner" zonering har inte kunnat påvisas varken med IMGRE-metodiken eller diskriminantanalys.

Det är inte särskilt förvånande med tanke på alla olika processer som leder fram till den elementfördelningen som vi kan observera idag.

1. Primär malmbildning (vulkanisk, vulkanisk-sedimentär, sedimentär, proximal-distal).

2. Omflyttning av element under diagenes-kompaktion.

3. Migration av vissa element i saltlösningar genom permeabla formationer.

4. Omflyttning i samband med metamorfos och tektoniska processer.

5. Posttektonisk till recent transport av vissa element.

Därmed skall geokemin i fast klyft inte utdömas som en metod som i vissa fall kan vara av intresse för prospektering efter sulfidmalmer. Det är dock väsentligt att man känner väl till den geologiska miljön vid tolkningen av de geokemiska resultaten och anpassar tolkningen till de konkreta geologiska förhållandena i stället för att tillämpa en standardmodell.

1983-05-09
H Zweifel/ab

NÅGRA FÖRSÖK MED NYA METODER

Lennart Malmqvist
Boliden Mineral AB
93050 Boliden

Föredraget kan p.g.a. tidsbrist inte publiceras i denna volym. Emellertid kommer det att publiceras på engelska under senare delen av 1983.

Bedrock geochemistry in exploration for Sn, Mo, W and U

M R Wilson, Sveriges Geologiska AB, Luleå

What features of a rock unit are indicative of the presence of a mineralisation? Geochemistry is only one of the large number of features that needs to be studied. And by geochemistry is not meant merely major and trace element analyses, but geochemistry in the wider sense of Barnes' book "Geochemistry of hydrothermal ore deposits" (2nd ed. 1979) which also includes studies of isotopes, fluid inclusions, phase relationships etc. For example temperature studies using fluid inclusions and oxygen isotopes may help to locate the gold-bearing parts of quartz-vein systems. Furthermore geochemical features cannot be considered in isolation - element abundances are intimately related to mineralogy and to the petrogenetic processes involved in the formation and alteration of igneous, sedimentary and metamorphic rocks. We must therefore integrate the wide range of geochemical techniques with geological, mineralogical, experimental and geophysical data.

Bedrock geochemistry is not a "numbers game" - geochemical associations characterise specific geological environments. The questions is therefore which associations are particularly interesting to the economic geologist.

This type of investigation is well advanced for basic rocks and the associated sulphide deposits eg. Stephens 1982. In recent years attention has been directed towards granitic rocks and also to acid volcanics, through the relationships of these rocks to W, Sn, Mo and U mineralisations, e.g., Evans, 1982. Of the many important studies of granitoid geochemistry one can especially mention Chappel and White's (1974) use of a wide range of geochemical, geological and geophysical characteristics to study the evolution of granitoids in Australia.

The relationships between the geochemistry of acid magmatic rocks and U, Mo, W and Sn mineralisations in N. Sweden is currently being studied by workers at SGAB in Luleå. Our work begins with regional geological and geophysical studies and continues with major and trace element analyses, age and isotope studies (Pb, Sr, Nd and O) and mineralogy. Preli-

minary results are reported in Troëng et al (1982), Wilson and Åkerblom (1982) and Wilson and Fallick (1982). Some of the main conclusions are now described:

1) Certain types of granitic rocks (termed "specialised granites") are often regionally associated with U, Mo, W or Sn mineralisations - although in detail the mineralisations often lie just outside the granites.

2) Granites associated with Sn, Mo and W mineralisations are usually enriched in U and Th, as pointed out by Armands and confirmed by Wilson and Åkerblom (1982). The airborne radiometric survey conducted by SGU is therefore an excellent guide to the regions with W, Sn and Mo mineralisations - if these radiometric maps had been used as regional surveys for W, Sn and Mo all the current major ore provinces would have been discovered!

3) Specialised granites are highly evolved both geochemically and mineralogically. They have high differentiation index, high SiO_2, marked Eu anomalies and are LREE enriched. They also have high Rb and F and low Sr, Ba and K/Rb ratios. Many have lost considerable amounts of U and/or Pb.

4) Not all highly evolved granites are associated with mineralisations. Juniper and Kleeman (1979) have used major elements to denote tin favourability. Their criteria also distinguish a number of granites such as Bastusel and Arvidsjaur, which are <u>not</u> associated with mineralisations.

5) There is no apparent geochemical or isotopic (O, Nd) difference between barren and fertile evolved granites.

6) The specialised granites of S Norrbotten, N Västerbotten (Storuman) and Olden (Jämtland) do <u>not</u> have a long crustal history despite often high initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios. This is demonstrated by their Nd isotopic ratios. Their high degree

of evolution has resulted from a short but intense period of reworking.

7) Both marine sedimentary (Storuman) and continental (S Norrbotten) environments favour specialised granites. The Storuman granites (U and Th enriched and associated with Sn and W mineralisations) have an oxygen isotope composition normally indicative of a sedimentary precursor (S-type).

8) U, Th and other incompatible elements are preferentially accumulated in the late stages of magmas because they are rejected by the main rock forming minerals. The sources of magmas in the Storuman - Arjeplog - Jokkmokk region were clearly enriched in U, Th, W, Sn and Mo.

9) Problems needing attention are as follows.

   a) The fundamental reasons for metal enrichment in the Storuman - Arjeplog - Jokkmokk region.

   b) Factors controlling progressive enrichment during magmatic evolution.

   c) Factors controlling the step from metal enrichment in a magma to hydrothermal mineralisation.

Geochemical studies alone are incapable of solving these problems - we need studies of the deep regional structures and their evolution in time, and of the structural factors controlling granite emplacement, alteration and the formation of hydrothermal systems. Geochemical investigations must be complemented by geological, geophysical and structural studies. The International Lithosphere Project can play an important role in this.

References

Barnes, H.L. (Ed) "Geochemistry of Hydrothermal ore deposits" 2nd Edn. 1979, Wiley, New York.

Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1974: Two contrasting granite types. Pacific Geology, 8, 173 - 174.

Evans, A.M. (Ed) "Metallization associated with acid magmatism" 1982, Wiley.

Juniper, D.N. and Kleeman, J.D. 1979: Geochemical characterisation of some tin-mineralising granites of New South Wales. J. Geochem. Exploration, 11, 321 - 333.

Stephens, M.B., 1982. Field relationships, petrochemistry and petrogenesis of the Stekenjokk volcanites, Central Swedish Caledonides. Sver. geol. unders. C 786 111 pp.

Troëng, B., Stuckless, J.S. and Smellie, J.A.T. 1982. Precambrian Uraniferous granites of the Olden window, Jämtland, N. Sweden. OECD Symposium on Uranium Exploration Methods, pp. 323 - 334 OECD, Paris.

Wilson, M.R. and Åkerblom, G.V.1982. Geological setting and mineralogy of uranium-rich granites in the Proterozoic of Sweden.Min. Mag. 46, 235 - 247.

Wilson, M.R. and Fallick, A.E. 1982. The relationship between uranium-enriched granites and hydrothermal mineralisation in northern Sweden. OECD Symposium on Uranium Exploration Methods, pp. 293 - 306. OECD, Paris.

Samordning av geologi, geofysik och geokemi i det systematiskt upplagda prospekteringsarbetet

Sigvard Ljung
Nämnden för Statens Gruvegendomar
11780 Stockholm

Sammanfattning

En kortfattad beskrivning ges av uppläggningen av den s k basprospekteringen som infördes i den statliga prospekteringsverksamheten år 1978. Syftet med basprospekteringen har varit att identifiera nya målområden eller malmprovinser för att uppnå en regional breddning av prospekteringsverksamheten utanför de kända malmprovinserna. Identifikationen av målområdena har skett genom en systematisk uppläggning av en inventeringsfas omfattande kvartärgeologisk kartering, geokemisk provtagning, flygmätning och översiktlig geologisk kartering samt i vissa fall även gravimetermätningar. Som ett exempel på en genomförd basprospektering kan nämnas det s k Jokkmokkprojektet som genomfördes även 1979-1981. Resultatet av detta projekt blev bl a att en ny Mo-W-provins relaterad till komplexa granitintrusioner i kalkiga sediment (Snavva-Sjöfallssedimenten) kunde påvisas.

Blickar framåt angående berggrundsgeokemi som prospekteringsmetod i Sveriges urberg

Öivind Toverud
LKAB prosp. AB
Box 5801
10248 Stockholm

Med anledning av nyligen slutet avtal med BP Minerals och inlämnade offerter/ansökningar om ekonomiska bidrag till organisationer/myndigheter, vars utfall för PAB:s vidkommande kan komma att medföra uppbindande av avsevärda resurser synes Prospekteringsbolaget för närvarande inte ha några större möjlighter att ägna personella resurser åt utvecklingsarbete avseende berggrundsgeokemi.

Vid diskussioner med BP under avtalets utformning har dock funderingar och tankegångar framkommit från ömse håll att berggrundsgeokemiska undersökningar avseende volfram i karbonatbergarter och malmer av greisentyp är något som kan komma att prioriteras. En ytterligare potentiell malmtyp där berggrundsgeokemi kan komma att tillämpas är vid prospektering efter "diskordansmalmer", vilka exempelvis kan uppträda i kontakten mellan Jotnium och underlagrande plutoniter.

Vid fortsatta prospekteringsarbeten i norra Norrbotten kommer liksom tidigare berggrundsgeokemi att användas företrädesvis för bergartsklassificering. Några undersökningar motsvarande de som utförts av Drake och Selinus är f n ej aktuella för PAB:s vidkommande i denna del av landet. Vi är dock självfallet i fortfarighet intresserade av att ställa undersökningsmaterial och ekonomiska resurser till förfogande om några nya intressanta projekt initieras.

I stället för prospekteringsinriktad berggrundsgeokemi har PAB hittills delvis på grund av resursbrist och i någon mån avsaknad av tradition inom (ämnes)området satsat och kommer att satsa på djupmorän - kaxprovtagning inkluderande utveckling av (tung) provtagningsutrustning. I områden med relativt komplicerade kvartärgeologiska förhållanden, gäller företrädesvis norra Sverige, där dessutom frekvensen av blottad berggrund är låg (<5%), är det sannolikt möjligt att fortfarande finna malmer som har ett utgående och som står i kontakt med överlagrande moräner/glacifluviala avlagringar där på markytan inga synliga tecken (malmblock) på en underlagrande malm förekommer.

Utöver nämnda satsning på djupmoränprovtagning kommer utvecklingsarbetet med PAB:s egen tungmineralmetodik att fortsätta.

Vi anser att med den nya generationen av plasmaspektrografer som nu finns tillgängliga på marknaden kan man klara sig med en betydligt lägre grad av anrikning avseende stora moränprov på grund av att detekterbara gränsen för de flesta spårelement nu är en tiopotens lägre än för den äldre generationen av plasmaspektrografer.

En ny plasmautrustning av typ Jarrell-Ash är under installation vid PAB där nedanstående element kan analyseras:

Elementlista för ICP-OES

Huvudelement n=8

Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ti

Spårelement n=31

Ag, As, B, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cu,
Ge, La, Li, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Pd, Rb,
Sb, Se, Sn, Sr, Ta, V, W, Y, Zn, Zr

Detekterbara gränsen för ovanstående spårelement är 1-5 ppm, undantag Rb > 5 ppm.

Detta, dvs påvisande av halter ned till 1 ppm:s nivå innebär att anrikning av tunga mineral från ett större moränprov nödvändigtvis inte behöver utföras med tunga vätskor utan kan ske på ett betydligt enklare sätt och därmed väsentligt nedbringa kostnaden vid användandet av provtypen ifråga.

Utöver ovannämnda satsningar på moränprov används självfallet andra konventionella provtyper såsom t ex myrtorv, bäcktorv, bäcksediment och humus.

Det är i detta sammanhang värt att nämna att även s k blind ores kan spåras i främst organiskt material i glaciala avlagringar. Detta kan ske på så sätt att vatten i berggrunden som varit i kontakt med malmer/mineraliseringar innehåller joner av malmförande element som sedermera

återutfälls och anrikas i organiskt material vilka kan påvisas vid efterföljande analys. Det bästa exemplet på utnyttjnde av organiskt material vid prospektering efter blind ores kan hämtas från Kanada där en geokemistkollega i sitt undersökningsmaterial indikerat en uranmalm på 150 meters djup från markytan ner i berggrunden i kontakten mellan en överlagrande sandsten (Athabasca Sandstone) och metasediment.

Sammanfattningsvis kan sägas att på grund av de höga kostnader som berggrundsgeokemisk prospektering innefattar andra alternativa geokemiska metoder/provtyper i de flesta fall först insättes vid PAB:s egna geokemiska undersökningar. Som nämndes i ingressen är det dock troligt att PAB i sitt samarbete med BP Minerals kommer att ägna större resurser åt berggrundsgeokemiska undersökningsmetoder i framtiden. En ny och intressant infallsvinkel är användandet av multivariata statistiska metoder i geokemisk prospektering som redovisats under detta symposium.

Ytterligare aspekter avseende framtida intressanta berggrundsgeokemiska/ mineralogiska undersökningar är fortsatta spårelementstudier av enskilda mineral (t ex glimrar) för att därigenom indirekt indikera malmpotentiella områden.

Ett annat icke oväsentligt område där "berggrundsgeokemi" i framtiden kan användas är analys av lösa avlagringar (morän) för att kartlägga underliggande berggrund. Detta är möjligt genom den snabba utvecklingen på analyssidan där mycket låga koncentrationer för allt fler element kommer att kunna analyseras.

I framtiden bör berggrundsgeokemiska undersöknings/forskningsresultat samlas i någon form av databank/arkiv hos NSG/SGU så att materialet är lättåtkomligt för presumtiva avnämare.

URBERGET - VÅR FRAMTID!

Gösta Armands
Geologiska Institutionen
Stockholms Universitet
10691 Stockholm

I min egenskap av initiativtagare till det rätt omfattande projektet "Petrogenetisk malmprospektering" som pågått sedan 1974 med stöd av STU, NFR och LKAB har jag haft tillfälle att redovisa uppnådda resultat i ett flertal publikationer bl.a. "Litogeokemisk malmprospektering med särskild hänsyn till Sn, W och Mo i svenska granitoider" G. Armands och K.-M. Drake 1978.

Denna undersökning visar klart att berggrundsgeokemin bl.a. kan användas i regional skala för att lokalisera områden med potentiellt malmförande granitoider. (Sn+W-Mo-Li-F-Nb-Ta-Be-U-Th-Au, sällsynta jordartsmetaller /REE/ och andra litofila element). Malmprospekteringskostnaderna kan därför reduceras avsevärt genom att man kan styra kostnadskrävande detaljprospekteringsarbeten till endast de granitområden, vilka från den tidigare regionala litogeokemiska undersökningen uppvisar geokemiska och andra geologiska kriterier vilka kännetecknar malmproduktiva granitoider. Dessutom kan litogeokemisk malmprospekteringsmetodik med fördel användas för att upptäcka lokala geokemiska aureoler som är relaterade till enskilda malmförekomster.

Metodiken ger även ökad möjlighet till bättre planering och områdesprioritering vid fortsatta prospekteringsinsatser både på regional och lokal nivå, genom att en granitoids malmförande potential kan uttryckas kvantitativt i statiska sannolikhetstermer.

Då framför allt en rad litofila legeringsmetaller, REE och även guld fått ökad aktualitet och ökad betydelse i det moderna samhället utgör den litogeokemiska metoden enligt min mening det mest lämpliga prospekteringsvalet för dessa element.

Jag har märkt att man från olika håll är oklar över vad litogeokemisk prospektering innebär. Det finns idag en tendens till att sätta likhetstecken mellan berggrundsgeokemisk prospektering och djupprospektering.

Den information som t.ex. STU går ut med i foldern 1982 "Teknikutveckling för

djupprospektering" ger en ensidig bild av berggrundsgeokemi i fast berg.

Även SGU:s och Svenska gruvföreningens cirkulär nr 2 och 3 till detta möte ger en ensidig bild. Där står "Berggrundsgeokemiska undersökningar har under senare år utförts i ett stort antal svenska gruvor" osv . . . . . .

Man måste göra klart för sig att det vi benämner berggrundsgeokemisk eller litogeokemisk prospektering innefattar, två helt olika metoder nämligen litogeokemisk djupprospektering och litogeokemisk ytprospektering (regional eller lokal).

Dessa metoder utnyttjar olika egenskaper och skiljer sig starkt i många avseenden men har ett gemensamt huvudmål - att hitta anomalier och malm.

Djupprospektering via borrkärnor baseras ju som vi vet på malmers zonerade aureolbildning och innebär bl.a. bestämning av variationer i multielementfördelning över och under malm i form av multiplikativa aureoler och kontrastrika produktivitetskvoter framför allt inom eller i anslutning till redan kända komplexmalmer, hydrotermala eller metasomatiska sulfidmalmer och malmfält.

Regional ytprospektering av granitoida bergarter däremot går ut på att bestämma och lokalisera petrogenetiskt och metallogenetiskt anomala områden, inom vilka detaljerad litogeokemisk ytprospektering kan ske och ev. åtföljt av senare djupprospektering. Eftersom den svenska berggrundsgeokemiska prospekteringen har fått denna snedbelastning, till förmån för djupprospektering, vill jag passa på tillfället att försöka ändra på det.

Vi kan idag inte skylla på att det föreligger brist på lämplig geokemisk prospekteringsmetodik, även om det givetvis alltid kommer att krävas stora insatser för ytterligare utveckling inom detta område.

Vad är det då för faktorer som gör att tillämpningen av dessa metoder hittills trots allt varit relativt begränsad? Det finns flera skäl till det som jag ser det. En avgörande faktor är att man har bedömt kostnaderna, särskilt de kemiska analyskostnaderna som avskräckande, eftersom ett stort antal element ofta skall analyseras. En annan orsak är att geokemisk berggrundsmetodik ännu inte har gått in i medvetandet hos ansvariga ledningar, delvis som en följd av bristande kunskap om dess tillämpningar och möjligheter, och delvis på grund av inbyggd trögghet i systemet att införa nya prospekteringsmetoder.

De flesta av oss är tvungna att inse att möjligheterna idag att finna nya större ytligt belägna basmetallmalmer och nya malmfält för basmetaller i Sverige är begränsade utanför de redan nu kända.

De åtgärder som man bör vidtaga inom dessa områden är som jag ser det helt klara: nämligen ökad användning av geokemisk djupprospektering. Det gäller att med alla kända metoder framförallt geofysik i kombination med nu välkänd geokemisk djupprospektering, öka letningsdjupet, inom de kända malmfälten där det redan finns uppbyggd industri och infrastruktur, vilket givetvis är av mycket stor betydelse för lönsamheten.

Men det man glömmer bort är att den svenska gruvnäringen för första gången på århundraden står inför en helt ny situation, ett vägval, till en i det närmaste helt ny epok för svenska förhållanden, där vi som jag ser det, bara befinner oss i början till ett mycket starkt expanderande skede. En epok med helt nya möjligheter, nämligen möjlighet till att prospektera efter andra typer av malmer och nya metaller som tidigare varit mycket svårprospekterade.

I klartext innebär detta att vi måste satsa minst lika intensivt på stor regional, regional och lokal litogeokemisk ytprospektering som på djupprospektering.

Som kontrast till den dystra och pessimistiska bild som nu breder ut sig på många håll inom gruvnäringen, vill jag peka på, och betona, att de litogeokemiska metoderna kan ge oss nya verkstyg, ett nytt sett att se på omgivningen, den öppnar nya perspektiv och ger förhoppningar om en positiv framtidssyn både för gruvindustrin och t.o.m. nya jobb för geologer. Det är ju nämligen så, att just de geologiska områden som tidigare ur prospekteringssynpunkt varit starkt eftersatta, plötsligt blivit mycket intressanta. Jag syftar på den mycket procentuellt stora del av Sveriges yta vars berggrund utgöres av primorogena, serorogena och postorogena granitoider.

Detta betyder att chansen till nyfynd av malmer av litofila legeringsmetaller inom detta enorma, jag skulle vilja säga "jungfruliga" område måste betecknas som mycket gynnsamma. Som en följd av denna utveckling, får nog vissa delar av gruvindustrin vara beredd att ändra synsätt och delvis gå ifrån bearbetning av de mer traditionella malmerna och gå över till prospektering och bearbetning av malmer med mer litofil karaktär. Dessa malmer kommer troligen att vara relativt små och många samt vara mer geografiskt spridda än tidigare malmer, men med höga malmvärden.

Som ett led i att förverkliga denna utveckling utgör bl.a. en ökande användning av storregional geofysik eller snarare petrogeofysik där möjlighet till registrering och klassificering av t.ex. magnetitseriens och ilmenit-seriens granitoider i form av S- och I granitoider kommer att spela en roll för lokalisering av bl.a. basmetallsulfider, guld, silver, molybden, volfram och porfyr-typ mine-

raliseringar resp. I-granitoidernas tenn, volframmineraliseringar. Den ger även möjlighet till registrering av olika strukturer t.ex. domstrukturer och multidomstrukturer, vilket givetvis är av utomordentligt stor betydelse. Men dessa strukturer ger inte tillräcklig information om eventuell mineralisering.

Det är bl.a. här som litogeokemisk malmprospektering kommer att intaga en mycket viktig, för att inte säga avgörande roll i framtiden. Dels för att selektivt välja vilka strukturer som är mineraliserade och dels för detaljerad litogeokemisk analys av de på detta sätt utvalda strukturerna.

Det finns redan idag utarbetade litokemiska metoder som t.ex. möjliggör utvärdering av geokemiska anomaliers erosionsnivåer.

Man kan alltså avgöra med stor kontrast, genom att analysera en multielementanomali, om t.ex. erosionssnittet är i nivå med taket i en granitdom eller om erosionssnittet är flera hundra meter (200-300 m) över taket till en sådan granitdom. Var och en inser lätt den stora prospekteringsbetydelse som detta innebär.

Som jag ser det är det inom och i anslutning till dessa domstrukturer som en stor del av Sveriges framtida fyndigheter kommer att finnas. Dessa kommer troligen att få mycket stor betydelse. För närvarande görs det alldeles på tok för lite geokemi på dessa. En stark integrering mellan petrofysik och berggrundsgeokemi bör därför eftersträvas. Dessutom tillkommer givetvis de mer rutinbetonade storregionala möjligheterna att skilja potentiellt malmförande bergarterna åt från bergartskomplex som inte håller malm, just med avseende på de kemiska elementens karaktäristiska associationer och regelbundenheter i fördelningen av dessa element. Man strävar därför efter att göra grupperingar med avseende på petrokemiska, petrogenetiska och metallogenetiska grunder även innefattande tidsgruppering och tektonisk gruppering, där åldersbestämningar och vissa isotopbestämningar är av betydelse ($^{87}Sr/^{86}Sr$). Förutom analys av hela bergarten kan också analys av metallogenetiska indikatormineral som biotit och muskovit med fördel användas som indikatorer på en rad malmelement.

Målsättningen vid litogeokemisk prospektering är således att finna vissa elementdispersioner tillräckligt över normala halter för att kallas anomalier, som förhoppningsvis kan indikera mineralisering av ekonomiskt intresse.

Berggrundsgeokemiska prospekteringsmetoder baseras därför huvudsakligen på systematiska studier av kemiska elements dispersioner i bergarter associerade med mineraliseringar. Storregional, översiktlig, berggrundsgeokemisk undersökning är ur prospekteringssynpunkt, som jag ser det, av mycket stor betydelse, för att på ett snabbt och billigt sätt och med ett relativt litet antal prover, urskilja gynnsamma geokemiska-metallogenetiska provinser och för att påträffa malmpoten-

tiella bergartstyper.

Generellt tillkcmmer dessutom som standardmetod användning av en rad indikatorelement och specialkoefficienter för tolkning och bestämning av granitoiders kristallisations- och differentiationsgrad.

Egna resultat visar t.ex. att Rb, Ba, Sr, Li, K, Mg, Sn, Ti och en del andra element antingen som kvoter eller i triangeldiagram uppvisar mycket markanta, selektivt goda kontraster mellan odifferentierade och mer eller mindre starkt differentierade granitoider.

Detta möjliggör på ett relativt enkelt sätt, lokalisering av greisenomvandlingar och mineraliseringar i dessa.

Som ett ytterligare led i denna utveckling har jag åtminstone sedan 1965 och därefter vid ett flertal tillfällen försökt att både i rapporter och föredrag framhålla den radiometriska gammaspektrometrins betydelse. Det finns fortfarande mycket starka skäl till att ånyo påminna om denna prospekteringsmetod i samband med litogeokemi.

Jag vill därför hänvisa till två föredrag:

"Uranförekomsters primära aureoler" och

"Petrogenetisk malmprospektering"

som jag höll vid STU:s informationsmöte 1975 på vetenskapsakademien och jag ber att helt kort få återge följande:

"Under den tid som radiometrisk prospektering har bedrivits här i landet och fortfarande bedrivs, har ett mycket stort antal radiometriska anomalier framkommit i samband med regionala flyg- och bilmätningar. Det rör sig om 1000-talet per år. Totalt är antalet mycket stort.

Då möjligheterna till att tillfredsställande bedöma alla dessa anomalier är begränsade med nuvarande metoder har antalet svårbedömbara radiometriska anomalier ständigt ökat. En av prospekteringsgeologens svåraste uppgift är att sovra bland erhållna anomalier. Efter vilka kriterier ska det i så fall ske? Vilka radioaktiva anomalier ska ägnas ingående undersökningar?

Vilken är den nu vanligaste geokemiska prospekteringsmetoden i Sverige, som ger största yt-täckning? Jag vågar påstå att det är radiometrisk flygmätning. Med denna får man fram på ett relativt billigt sätt, något så unikt som geokemiska anomalier med flygmätningar. Det är i själva verket en indirekt geokemisk prospekteringsmetod, som i mitt tycke har utnyttjats alldeles för lite.

Det är inte bara en fråga om uran och torium.

Jag betonar än en gång att vi här har att göra med områden som är anomala med avseende på kemisk sammansättning och allt vad det innebär".

Detta betyder i klartext att mycket större uppmärksamhet måste ägnas åt att utnyttja radiometriskt anomala områden som utgångspunkt för litogeokemisk prospektering inte bara för uran och torium och kalium utan i första hand efter Sn, W, Mo, Nb, Ta REE och en rad andra litofila element.

Eftersom gammaspektrometrimätningar både kan ske från luften och på marken utgör den en värdefull metod för att särskilja varianter inom sammansatta plutoner och batholiter som t.ex. senmagmatiska omvandlingar, albitisering, greisenomvandlingar och leucograniter.

Jag är medveten om att man för närvarande på en del håll överanalyserar och använder onödigt stort antal element och dessutom omständliga och dyra analyssystem och därför dyra analyser, vilket givetvis utgör en hämmande faktor för en expansion av berggrundsgeokemin. I STU:s folder "Teknikutveckling för djupprospektering" står dessutom "Analyskostnaderna är en begränsande faktor för berggrundsgeokemi". Detta förstärker tyvärr intrycket att berggrundsgeokemi är en dyr metod. Jag kan inte hålla med om det. Tvärt om.

Målsättningen vid berggrundsgeokemisk prospektering är ju att dels fastställa en bergarts malmpotential i avseende på specifika malmelementassociationer på basis av ett begränsat antal prover och dels välja lämpliga områden för mer detaljerad prospektering. Av avgörande ekonomisk betydelse är ett i förväg noga genomtänkt val av vilka element som skall ingå i en undersökning och vilka noggrannheter som krävas och hur dessa analyser skall användas. Det är detta som bestämmer analysmetod och val av analysinstrument. På dessa punkter syndas det friskt. Man bör beakta frågor som precision, detekterbarhetsnivå, risk för kontaminering, gäller också i samband med provtagning och provberedning, kostnad av analys av flera element samtidigt m.m.

Resultat från tidigare arbeten har visat att antalet ingående geokemiska variabler för varje bergartsprov kan begränsas till petrogenetiskt och metallogenetiskt kritiska parametrar eller till endast metallogenetiskt kritiska indikatorelement. Det går därför bra redan nu att sänka analyskostnaderna ned till 1/3 eller t.o.m. till 1/4 av tidigare kostnader, med bibehållande av metodens slagkraft.

Ett sådant analysförfarande medför givetvis starkt reducerade prospekteringskostnader.

Andra kostnadsreducerande åtgärder kan uppnås genom att bättre kombinera och samordna provtagningen. Jag tänker på provtagning vid geologisk kartering samt

framför allt i samband med geofysisk provtagning. Grunda borrhål i moräntäckta områden för geokemisk provtagning av berggrunden och geologisk kartering bör användas mer generellt.

För att minska kostnaderna för djupprospektering, tror jag, att det absolut snabbaste, effektivaste och enklaste sättet är att i första hand sänka borrningskostnaderna genom att i större omfattning frångå kärnborrningen till förmån för fullkroneborrning och analys av borrkaxet.

Även en bättre selektion av vilka element som skall analyseras och förenklad tolkningsteknik av dessa innebär besparingar.

Statistiska metoder som t.ex. olika multivariata metoder: faktoranalys, diskriminantanalys och regressionsanalys har givetvis sin givna roll för tolkning, men även enklare statistik skall inte föraktas. Ofta kan man komma mycket långt med det.

Malmprospekteringen utgör idag en alldeles för splittrad verksamhet med lite insatser här, och lite där, och med dålig samordning. Generellt skulle de absolut största kostnadsbesparingarna erhållas om malmprospekteringen kunde bedrivas på ett mer systematiskt sätt. Det gäller geofysik, geologisk kartering och geokemisk prospektering.

De geologiskt vita fläckar, som t.ex. Småland och en del andra dåligt karterade områden i landet utgör är givetvis hämmande faktor och bör snarast karteras. Man får för den skull inte slå sig till ro och passivt vänta att så skall ske.

Tvärtom, det är just här som berggrundsgeokemin har sin chans redan nu och där möjlighet till nyfynd är stora. Man bör därför satsa hårt på intensiv storregional litogeokemisk prospektering i dessa områden, på ungefär samma villkor som nu sker i vissa U-länder med gott resultat.

Målet med litogeokemisk undersökning är att framledes upptäcka potentiellt malmförande områden med avseende på sulfidförande basmetaller och litofila malmelement. Detta förutsätter att elementens regionala och lokala bakgrundsvärden och fördelningsformer är kända.

Då Sveriges berggrund, förutom de kända malmfälten, till stor del består av granitoida bergarter av olika åldrar, bör utsikterna att finna litofila mineraliseringar i granitisk terräng vara mycket gynnsamma.

För att på ett tillfredsställande sätt malmpetrogenetiskt kunna undersöka hela Sveriges granitoida berggrund krävs därför mycket omfattande ekonomiska resurser och personella insatser långt utöver vad som hittills varit fallet.

Tillämpning av de för svenska förhållanden relativt nya litogeokemiska malmprospekteringsmetoderna kommer sannolikt att få starkt ökad betydelse. Industrin har med dessa metoder fått nya styrmedel och möjlighet till planering för den framtida malmprospekteringen.

Resultaten av prospekteringsinsatserna kommer troligen i större omfattning att beröra nya områden, vilka tidigare inte haft gruvverksamhet, och därmed få social och samhällsfrämjande betydelse.

Sammanfattningsvis vill jag föreslå följande:

Öka generellt användningen av litogeokemiska prospekteringsmetoder för att på så sätt reducera prospekteringskostnaderna.

Öka intresset för domstrukturer.

Öka intresset för geokemisk tolkning av radioaktiva anomalier.

Öka användningen av fullkroneborrning och analys av borrkax vid djupprospektering.

Välj kemisk analys och element mer selektivt.

Analyskostnaderna kan sänkas till 1/3-1/4 av tidigare kostnader.

Öka samordningen mellan petrogeofysik och litogeokemisk prospektering.

Öka samordningen av provtagning vid geologisk berggrundskartering och vid geofysik.

Öka möjligheterna till provtagning via korthålsborrning.

Jag vill till sist sluta mitt anförande med följande:

Det är inte brist på lämpliga geokemiska metoder varken för djupprospektering eller ytprospektering. Det går utmärkt bra att med full styrka redan nu att praktiskt använda de berggrundsgeokemiska prospekteringsmetoder som vi nu har. De ekonomiska satsningarna på praktisk tillämpning bör därför göras nu.

Vänta inte på att metodutvecklingen skall bli fulländad.

Det blir den aldrig. Låt därför utvecklingen ske parallellt med den praktiska tillämpningen.

Referenser

Armands, G., 1976: Petrogenetisk malmprospektering samt

Armands, G., 1976: Uranförande primära aureoler. Geokemisk prospekteringsteknik. Föredrag och diskussioner vid informationsmöte den 24 oktober 1975 på Kungl. Vetenskapsakademien anordnat av STU, NFR och Svenska Gruvföreningen.

Armands, G., och Drake, K-M., 1978: Litogeokemisk malmprospektering med särskild hänsyn till tenn, volfram, molybden i svenska granitoider. Del I-V: A-B. Stockholms Universitet, Stockholm. STU (Styrelsen för Teknisk Utveckling) Report No 77-4170.

Armands, G., and Drake, K-M. in press: Metallogeny of Precambrian granitoids in Sweden. In, Metallogeny of the Precambrian. A.V. Sidorenko and A.A. Beus (eds.) John Wiley and Sons, New York.

Drake, K-M., 1981. Geochemistry of tin, tungsten and molybdenum in Swedish Proterozoic granitoids its potential use in regional mineral exploration. Meddelanden från Stockholm Universitets Geologiska institution. Nr 249.

BERGGRUNDSGEOKEMI ENLIGT RYSK MODELL

Olle Selinus
Sveriges Geologiska Undersökning
Box 670
751 28 UPPSALA

Under ett flertal år har ett samarbete pågått inom IVA:s ram mellan Sverige och Sovjet inom geoområdet. Berggrundsgeokemi har varit och är ett av de ämnesområden där konkreta arbeten utförts. Den instans i Sovjet som varit inkopplad har varit institutet IMGRE (Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements) i Moskva, med dess chef Grigorian.

Samarbetet har bl.a. inneburit att flera sulfidmalmer, bl.a. Renström har undersökts i Sverige med hjälp av de ryska metoderna. I och med detta har vi fått en unik insikt i hur man på IMGRE i Sovjet behandlar sitt analysmaterial.

Största delen av de ryska berggrundsgeokemiska undersökningarna baserar sig på enkla aritmetiska beräkningar. Grigorian (1977) anser att det finns en generell zoneringsföljd runt de flesta malmtyper trots stora skillnader i geologi etc. Han anser att zoneringsföljden från toppen (övermalmselement) till botten (undermalmselement) är följande:
Ba-(Sb, As, Hg)-Cd-Ag-Pb-Zn-Au-Cu-Bi-Ni-Co-Mo-U-Sn-Be-W. Två begrepp som är mycket vanliga är additiva aureoler (addition av olika element, standardiserade gentemot bakgrunden) och multiplikativa aureoler (multiplikation av olika element på samma sätt). Man bildar också kvoter av övermalms- resp. undermalmselement. Ett annat begrepp är linjära produktiviteter som är genomsnittliga halter av ett element i en aureol gånger aureolens utbredning i meter. Sorten är meterprocent.

I fig. 1 visas ett hypotetiskt exempel på arbetsgången. As och Ag är övermalmselement. 1B är en profil av Ag och Co vid nivå I och IV. 1C visar de multiplikativa aureolerna (Ag x As/Cu x Co) vid olika nivåer, och 1D visar linjära produktiviteten för Ag och Co, och kvoterna för linjära produktiviteterna hos Ag, As, Cu, Co.

Fig. 2 visar uträkningsgången för lineär produktivitet. Kvoten I/IV benämns av ryssarna för kontrastkoefficienten. Efter att produktiviteten uträknats, räknar man ut zoneringsindex (fig. 3). Först "normaliseras" produktiviteterna så att de alla får samma storleksordning. Maximala produktiviteten för Ag är t.ex. 1.18 vid nivå I. Maximala produktiviteten för As är 0.213 vid nivå II. Därför multipliceras alla produktiviteter för As med 10. Motsvarande sker för de övriga elementen. Zoneringsindex är kvoten mellan den normaliserade lineära produktiviteten med summan av de normaliserade lineära produktiviteterna. Zoneringssekvensen fås ur storleksordningen av zoneringsindex vid respektive nivå. Enligt fig. 3 blir den Ag-As-Co-Cu.

Zoneringsföljden bygger alltså på de resultat som erhålls från zoneringsindex. Men detta bör vara känsligt för såväl analysfel som provtagningsfel. Om man antar att analysfelet ligger inom c:a ± 6-7% vilket är mycket rimligt, och att man definierar bredden på aureolen för Ag till 450 m vid nivå I, för Cu till 300 m och 350 m vid nivå III resp. IV vilket också är rimligt då det torde vara en definitionssak var bakgrunden skall sättas, blir resultatet enligt siffrorna i parentes i fig. 2 och 3. Detta betyder att zoneringsföljden istället för Ag-As-Co-Cu blir As-Ag-Cu-Co. På detta-sätt går det att visa att zoneringsföljderna kan slå om markant vid skillnader som ligger inom felmarginalerna. Detta sätt att beräkna zoneringsföljden blir alltså helt beroende av provtagning (om man får in, eller undviker en obetydlig mineralisering kan medelvärdet ändras betydligt), analysfel och definitioner av aureolens bredd.

Efter detta bygger man med hjälp av olika kvoter upp "parametrar". I Renströmsundersökningen förekommer följande:

Zoneringsparametrar: $\frac{Sb \times Ag}{Cu \times Mo}$, $\frac{Sb \times Ag \times Pb \times As}{Co \times Bi \times Cu \times Mo}$, $\frac{Sb \times Ag \times As}{Bi \times Cu \times Mo}$,

$\frac{Pb \times Ag \times Ba}{Zn \times Cu \times Co}$

Ekonomiska parametrar: $\frac{Pb \times Ag \times Zn}{Co \times Ni \times Cu}$, $\frac{Pb \times Ag \times Zn \times Cu}{Co \times Ni \times Bi \times Mo}$,

Kulissparameter: $\frac{Pb \times Ag \times Ba}{Cu \times Zn \times Co}$ Malmstypsparameter: $\frac{Pb \times Ag \times Ba}{Zn \times Cu \times Co}$

Den ekonomiska parametern anger en bedömning av värdet av en påträffad anomali. Kulissparametern anger om man närmar sig en ny mineralisering. De

angivna parametrarna byggs upp, uppenbarligen ganska godtyckligt. Det finns inga geologiska grunder att stå på vid förklaringar av varför en viss kvot är en parameter och annan kvot en annan parameter. Likaså kan tydligen vid en och samma malm, samma kvot ($\frac{Pb \times Ag \times Ba}{Zn \times Cu \times Co}$) vara både zonerings- malmtyps- och kulissparameter.

I publikationer från IMGRE nämns att kvoten $\frac{Pb \times Zn \times Ag}{Cu \times Co \times Bi}$ skulle ange i vilket läge av malmzonen man befinner sig i. Men i Renströmsundersökningen är det ej så, och dessutom finns det inga vetenskapliga grunder till varför så skulle vara fallet, i all synnerhet inte om efterföljande metamorfos och veckning har stökat till elementfördelningarna. Denna kvot kan också vara starkt beroende av provtagningen. Det räcker med att provtagning skett bl.a. i någon svag Pb-Zn-mineralisering för att kvoten ska bli stor. Med andra ord kan kvoten bara bli ett uttryck för att man har kommit in i en Pb-Zn-mineralisering.

Mutliplikativa produktivitetskvoten är dessutom mycket känslig för låga tal i nämnaren. Många av de element som förekommer i nämnaren, och som alltså tolkas som undermalmselement, är ofta mycket låga, t.ex. Bi, Ni, Co, Mo och Sn. Kvoterna blir då mycket stora, och enligt IMGRE betyder en stor kvot att man är ovanför malmen om undermalmselementen är placerade i nämnaren, och det är att göra det väl lätt för sig.

Denna metodik förutsätter också att det förekommer en väl utbildad zonering runt malmerna. Men gör det alltid det? Jag har tidigare visat på flera exempel (t.ex. Stollberg) där någon utbredd råvärdeszonering ej funnits och där man enbart med multivariata statistiska metoder kunnat få fram en sådan. I sådana områden går det uppenbarligen inte att använda den ryska metodiken.

Trots att de ryska undersökningarna grundar sig på aureol-analyser har inte begreppet aureol definierats. Vad man speciellt efterlyser är upplysning om hur aureoler avgränsas på sin "inre" mot malmen vända sida och på sin "yttre". På den inre sidan måste, om aureolen beräknas börja vid malmgränsen, en impregnation av malmmineral ingå i analyserade prover. Detta medför dels att dessa prover kommer att dominera i en medelvärdesbildning och dels en viss osäkerhet i värdena på grund av inhomogeniteter i impregnationen (jfr svårigheterna vid provtagning av ett impregnerat malmblock). Den yttre

sidan av aureolen å andra sidan måste ha ett olika läge för olika element om aureolen anses begränsas av ett visst tröskelvärde, t.ex. n gånger bakgrunden.

Vidare har jag ingenstans sett att antalet element i täljare och nämnare skiljer sig åt. Om det uppenbarligen inte går att få lika många element, så kvadreras något av elementen, t.ex. Pb x Zn x Ag/Bi x Cu^2. Detta är inte alls ovanligt, men ingenstans förklaras varför t.ex. Cu väljs i detta fall. Om Bi väljs till kvadrering istället torde resultatet kunna bli annorlunda.

Sammanfattningsvis bör man också säga att svårigheten att från en gruva erhålla representativt och tillförlitligt provmaterial utan mycket stora kostnader gör, att man måste ställa sig skeptisk till "den ryska metoden" att prospektera berggrundsgeokemiskt i närheten av äldre fyndigheter.

Tveksamheten mot den ryska metoden blir ännu större om man tar i betraktande, att man tydligen kan välja ganska friskt bland de analyserade elementen när man bildar sina parametrar. Härigenom införes en subjektivitet vid urvalet, som gör att man kan stödja en på förhand uppställd teori om hur parametrarna bör se ut.

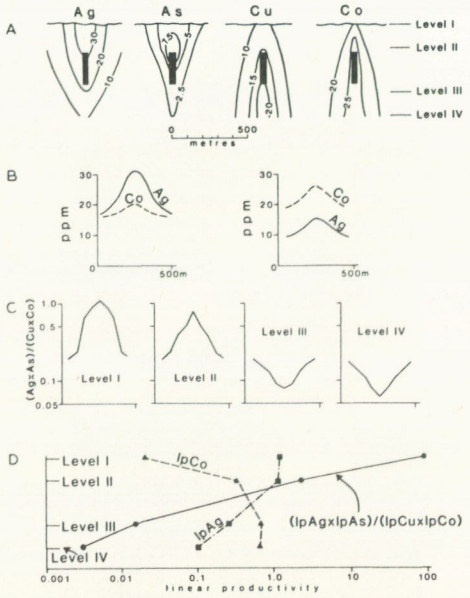
Referenser

Barsukov,V.L., Grigorian,S.V., Ovtjinnikov,I.N., 1981. Geochimitjeskie metodi poiskov rudnich mestorosjdenij. (på ryska), Izdatelctvo Naika.

Beus, A.A., Grigorian, S.V., 1977: Geochemical methods for mineral deposits.
Applied publishing ltd. 287 pp

Govett, G.J.S., 1983: Rock geochemistry in mineral exploration. Handbook of geochemistry, part 3.
Elsevier. 461 pp.

Grigorian, S.V., 1974: Primary geochemical haloes in prospecting and exploration of hydrothermal deposits.
Int. Geol. Rev. 16 (1): 12-25.



Schematic illustration of anomaly enhancement through the use of multiplicative halos and linear productivities. A. Distribution of supra-ore elements (Ag, As) and sub-ore elements (Cu, Co). B. Profile of Ag and Co along levels I and IV. C. Multiplicative halos (Ag × As)/(Cu × Co) at the different levels. D. Linear productivities for Ag and Co, and ratios of linear productivities for Ag, As, Cu, and Co. (Modified from Govett, 1977 and Govett and Nichol, 1979.)

Fig 1.

Mean concentration for As, Ag, Cu, Co, width of anomaly, and linear productivity (lp = mean × width × 10^{-4}) at different depth levels for data in Fig. 3-10

Level	Ag			As		
	mean (ppm)	width (m)	lp (m%)	mean (ppm)	width (m)	lp (m%)
I	23.7 (22.5)	500 (450)	1.18(1.01)	3.9 (4.2)	400	0.156(0.168)
II	23 (24.5)	500	1.15(1.23)	7.1 (6.5)	300 (250)	0.213 (0.16)
III	18.4	130	0.24	2.5	100	0.025
IV	10.0	100	0.10	2.5	50	0.0125
I/IV	2.37(2.25)		11.8(10.1)	1.56 (1.68)		12.4 (13.4)

Level	Cu			Co		
	mean (ppm)	width (m)	lp (m%)	mean (ppm)	width (m)	lp (m%)
I	10.0	100	0.1	20.0	40	0.08
II	11.7	200	0.334	23.7	140	0.33
III	16.0 (15)	360 (300)	0.576(0.45)	23.1	300	0.69
IV	15.0 (16)	400 (350)	0.600(0.56)	22.3	300	0.67
I/IV	0.67(0.63)		0.17 (0.18)	0.9		0.12

Fig 2.

Zonality index for data in Fig. 3-10. Linear productivities are from Table 3-II. These are "normalized" by multiplying the factors given in brackets for each element. Zonal sequence from level I to level IV is Ag (0.44*)—As (0.52*)—Co (0.39*)—Cu (0.37*)

Level	Linear productivities (lp)				Normalized linear productivities (lp)				Zonality index ($lp/\Sigma lp$)			
	Ag	As	Cu	Co	Ag (×1)	As (×10)	Cu (×10)	Co (×10)	Ag	As	Cu	Co
I	1.18(1.01)	0.156(0.166)	0.100	0.08	1.18(1.01)	1.56 (1.68)	1.0	0.8	0.44*(0.39)	0.38(0.45)	0.06 (0.06)	0.05
II	1.15(1.13)	0.213 (0.16)	0.334	0.33	1.15(1.13)	2.13(1.62)	3.34	3.3	0.43 (0.48)	0.52*(0.48)	0.21 (0.16)	0.19
III	0.24	0.025	0.576(0.45)	0.69	0.24	0.25	5.76(4.50)	6.9	0.09	0.06	0.36	0.39*(0.3)
IV	0.1	0.0125	0.600(0.56)	0.67	0.10	0.125	6.00(5.60)	6.7	0.03	0.03	0.37*	0.38 (0.39)
Sum					2.67(2.58)	4.065(3.68)	16.1(14.4)	17.7				

Fig 3.

I SGU:s serie Rapporter och meddelanden har tidigare utgivits:

*1. Utredning rörande det svenska jordbrukets kalkförsörjning 1–2. 1931.
*2. **Sahlström, K. E.** Sveriges lodade sjöar. 1945.
*3. **Ödman, O. H.** Rapport över manganmalmsletningen i Jokkmokks socken 1940–48.
4. **Stålhös, G.** Bidrag till kännedomen om den radioaktiva strålningens fördelning inom den svenska berggrunden. 1959.
5. **Johansson, H. G., och Ericsson, B.** Grusutredningen -74. Översiktlig inventering av sand- och grusförekomster – Försöksverksamhet. 1976
*6. **Knutsson, G., m fl.** Grustillgångarna i Östersundsområdet. Del 1 inventering. 1976.
*7. **Ericsson, B.** Svallgrustillgångar längs Kilsbergen, Örebro län. 1977.
8. **Gustafsson, O., och De Geer, J.** Skånes större grundvattentillgångar. 1977.
9. **Knutsson, G., och Fagerlind, T.** Grundvattentillgångar i Sverige. 1977.
10. **Modig, S., Knutsson, G., Nordberg, L., och Persson, G.** Särtryck ur Ymer 1978 – Bebyggelsen och vattnet. 1978.
11. **Guy-Ohlson, D.** Jurassic biostratigraphy of three borings in NW Scania. (A brief palynological report) 1978.
12. **Gustafsson, O., Andersson, J.-E., och De Geer, J.** Sammanställning av hydrogeologiska data från Kristianstadsslätten. 1979.
13. **Hörnsten, Å.** Sand och övriga jordarter i Öresund. Kommentar till SGU:s maringeologiska karta över Öresund. (Under tryckning).
*14. Hydrogeologi vid SGU. Särutgåva av Vannet i Norden. 1979.
15. **Knutsson, G., Lindén, A., och Rudmark, L.** Grus och moräntillgångar i Nybroregionen. 1979.
16. **Wilson, M. R., och Sundin, N. O.** Isotopic age determinations on rocks and minerals from Sweden. 1960–1978.
17. **Karlqvist, L., och Qvarfort, U.** Modell för simulering av utbytesförlopp i ett sand – betonitskikt. 1980.
18. **Karlqvist, L., och Qvarfort, U.** Gruvhanteringens inverkan på Bersboområdet, Åtvidabergs kommun. 1980.
19. **Wilson, M. R., och Åkerblom, G.** Uranium enriched granites in Sweden. 1980.
20. **Cato, I., och Engdahl, M.** Beskrivning till temakartor utvisande var särskild uppmärksamhet av stabilitetsförhållanden erfordras inom vissa bebyggda eller detaljplanerade områden med lerjord.
21. **Olsson, T.** Ground-water-level fluctuations as a measure of the effective porosity and ground-water recharge. 1980.
22. **Bergström, J., och Shaikh, N.A.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Kristianstads län. Projekt i länsplanering 1980. 1980.
23. **Lilja, A.** Störning av berggrundens temperaturförhållanden vid hammarborrning. 1981.
24. **Agrell, H.** Gotska Sandöns kvartärgeologi. (Summary: The Quaternary geology of the island of Gotska Sandön in the Baltic.) 1981.

25. **Laufeld, S.,** (Ed.). Proceedings of Project Ecostratigraphy Plenary Meeting, Gotland, 1981. 1981.
26. **Fredén, C.,** m.fl. Tuveskredet, 1977-11-30. Geologiska undersökningar. Särtryck av SGI Rapp. 11 B. 1981.
27. **SWIM 81.** Intruded and relict groundwater of marine origin. Proceedings of Seventh Salt Water Intrusion Meeting, Uppsala, Sweden, 14–17, September 1981. 1981.
28. **Aastrup, M., Aneblom, T., Henriksson, B., och Persson, G.** PMK-grundvatten. Lägesrapport mars 1982. 1982.
29. Energigeologi. Exempel på verksamhet inom energisektorn vid SGU. April 1982.
30. **Åkerblom, G., and Wilson, C.** Radon – geological aspects of an environmental problem. 1982.
31. **Bergström, J., och Shaikh, N. A.** Malmer, industriella mineral och bergarter i Malmöhus län. 1982.
32. **Ericsson, B., och Grånäs, K.** SGU:s grusdataarkiv. 1983.
33. **Sivhed, U.** Upper Cretaceous Ostracodes from the Malen Limstone quarry and the river Stensån, southern Sweden. 1983.

* Utgången

SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING
Biblioteket
Box 670, 751 28 UPPSALA
Telefon 018–15 52 80

Cirkapris 30 kr inkl moms

ISBN 91-7158-304-1
ISSN 0349-2176

Offsetcenter AB, Uppsala 1983