

SVERIGES GEOLOGISKA AB
Division Prospektering
Uppdragsgivare: STU/SGAB
Projekt: FoU Skelleftefältet
L-Å Claesson

Datum: 1986-01-30
STU's ID-nr: 84-4465
SGAB's ID-nr: PRAP 85548
Plats: Malånäset

VULKANISK STRATIGRAFI I CENTRALA
SKELLEFTEFÄLTET

Slutrapport

STYRELSEN FÖR TEKNISK UTVECKLING	
Ank. 1986 -02- 13	
Dnr 84-4465	
Aa	Sign

Litogeokemisk karaktärisering av
vulkaniter och hydrotermalsystem
i västra Malånäsfältet.

SAMMANFATTNING

Malånäset, beläget i centrala Skelleftefältet, uppbyggs av sub-marint avsatta vulkaniter och sediment. Dessa bergarter tillhör den äldsta sulfidmalmsförande enheten av den så kallade "Skellefte Gruppen". Huvudparten av vulkaniterna är sura pyroklaster, vanligen fragmentförande kvarts-fältspatporfyrier. Ställvis uppträder inlagringar av finkorniga sediment, vilka ökar i maktighet uppåt i stratigrafin och mot nordväst. I de centrala och östra delarna av Malånäsfältet växellagrar sura vulkaniter med basiska lavar och tuffer.

En tolkning av de litologiska skillnaderna och geofysiska data har indikerat förekomsten av en större primär vulkanisk dom, en instörtningskaldera, ett centrum för den basiska vulkanismen och synsedimentära blockförkastningar.

Litogeokemiska studier av vulkaniterna har påvisat en starkt bimodal fördelning, uppdelad mellan ryodaciter/ryoliter och basalter/basiska andesiter av subalkalin karaktär.

Med hjälp av relativt stabila element har de sura vulkaniterna klassats som kalkalkalina, medan de basiska utgör en svagt tholeiitisk grupp. Dessutom har påvisats likheter mellan ryoliterna och Jörngranitoider av den äldsta fasen, med hjälp av REE elementen.

En tolkning av innehållet och sammansättningen av REE-elementen hos de vulkaniska bergarterna indikerar att de yngre basalterna troligen är genetiskt knutna till de äldsta basalterna. Bevisen för en primärt anlagt vulkankedja i Skelleftefältet är entydiga. De yngre basalterna antyder en påbörjad "rifting" av den äldre vulkankedjan. Detta antagande stärks ytterligare av att typiska intra-kratona basalter uppträder inlagrat i sedimenten söder och öster om Skelleftefältet.

Regionalomvandling, "spilitisering", har påverkat huvudparten av vulkaniterna i Malånäsfältet. Vid spilitiseringen har havsvattnet omvandlat vulkaniterna till kvartsskeratofyrer och spilit. Härigenom har Na tillförts samt Ca och K bortförts från vulkanitsekvensen. Lokalt i sura vulkaniter har en kraftig

anrikning skett av Si, Al, Fe, Mg, K, Ba, Cu, Zn, Y, Li, Ni, Pb, Rb, Sc, V, Co och REE elementen medan Ca, Na och Sr bortförs. Sulfidmalmsutfällning har skett på lämpliga ställen i detta anrikningssystem. Den basiska och ultramafiska magmatismen som uppträder högfrekvent mot djupet och som avsatts högre upp i stratigrafin antas utgöra värmekällan till detta hydrotermala konvektionssystem.

INTRODUKTION

Målsättningen med projektet "Vulkanisk stratigrafi i centrala Skelleftefältet" har varit att utifrån ett speciellt delområde definiera de olika vulkaniska produkternas petrografi och geo-kemiska egenskaper. Vidare syftar projektet till att beskriva områdets omvandlingshistoria och dess förhållande till de komplexa sulfidmalmena. Genom jämförelse med studier utförda av W. Vivallo, från andra delområden inom de sulfidmalmsförande delarna av Skelleftefältet (Boliden-Långdal- och Kristinebergsområdena), kan målområden för prospekteringen efter massiva sulfidmalmer i vulkanisk-sedimentära miljöer av liknande slag identifieras.

Datainsamling och analytiska metoder

Projektområdet utgörs av västra delen inom Malånäsfältet (Fig. 1). Detta representerar ett lika stort område som Boliden-Långdal-respektive Kristinebergsområdena, dvs cirka 50 km². En profil från Borup till Vargforsdammen har provtagits. Kompletterande prov har insamlats från Norrlidenområdet. Ett mindre antal prov från en tidigare regional studie, med avseende på vulkaniternas geokemiska karaktär och dess plattetektoniska bildningsmiljö (Claesson 1982, 1985), har utnyttjats i denna studie.

Vid provtagningen eftersträvades att erhålla material från alla petrografiska enheterna inom vulkanitsekvensen och ett antal av mer eller mindre omvandlade prover från områdena runt sulfidmineraliseringarna. Huvuddelen av proven utgörs av knackprov från

hållar. Borrkärnor har utnyttjats som provmedia runt mineraliseringarna. Inom den ekonomiska ramen för detta delprojekt har 56 st bergartsprover analyserats och mikroskoperats. Samtliga dessa prov har analyserats med ICP på SGAB's analyslaboratorium i Luleå, varvid huvudelementen (utan Si) samt 24 spårelement erhållits. Dessutom har (i 50 av dessa prover) halterna av lantanoid elementen (REE) bestämts i Nancy, Frankrike (Centre National de la Recherche Scientifique).

Skelleftefältet

Skelleftefältet (Fig. 2) har länge varit känt och beskrivet som ett viktigt sulfidmalmsdistrikt. Först att beskriva detta var Högbom (1899, 1910, 1931). Den första att beskriva Skelleftefältets betydelse såsom en övergångszon mellan en kraton och ett orogent område var Eklund (1923). Därefter följde geologiska beskrivningar av Gavelin (1923, 1926 a+b), Högbom (1937a, 1937b), Grip (1942, 1946, 1961, 1973), Gavelin (1939, 1948, 1955), Gavelin och Grip (1946), Kautsky (1956, 1957, 1959), Kautsky et al (1960), Helfrich (1971) och Lundberg (1980).

Lundberg (1980) sammanfattade tidigare resultat samt nya erfarenheter från karteringen under slutet av 1970-talet. Härvid används ett regionalt stratigrafischema som bygger på Gavelin (1955).

Sulfidfyndigheterna i Skelleftefältet har beskrivits av Eklund (1924), Gavelin (1939, 1942, 1943, 1948, 1955), Ödman (1939, 1941), Grip (1951, 1961, 1973), Grip och Wirstam (1970), Du Rietz (1953), Ljung (1974) och Svensson (1982), Trepka-Block (1982, 1985). Rickard (1979, 1982), Richard och Zweifel (1975), Rickard och Svensson (1984) har tolkat dessa fyndigheter som typiska stratabundna vulkaniskt exalativa sulfidmalmer.

Skelleftefältet har av många (Hietanen (1975), Rickard och Zweifel (1975), Adamek och Wilson (1979) samt Pharaoh och Pearce (1984)), antagits vara en Proterozoisk motsvarighet till moderna öbågebildningar.

I Claesson (1982,1985) redovisas resultat från en geokemisk studie av de sulfidförande Skelleftevulkaniternas egenskaper liksom deras likhet med typiska vulkanbågebildningar. Vidare studerades mafiska och ultramafiska vulkaniter i den yngre sedimentdominerande formationen. Dessa bergarters tektoniska bildningsmiljö var tidigare oklar. De utgörs troligen en övergångsfas från "volcanic arc" till en typisk spridningsrelaterad basaltisk vulkanism. Denna situation kan liknas vid en "inter-or back-arc rift".

Skelleftegruppens litologiska enheter

Enligt ett modifierat stratigrafischema från Lundberg (1980) har Skelleftegruppen indelats i tre formationer (Fig. 3).

Den undre formationen består av submarint avsatta, omvandlade sura vulkaniter (kvartskeratofyrer), ställvis växellagrande med spilitiska basalter. Regionalt utgörs de sura vulkaniterna av fragmentförande och finlaminerade pyroklastiska typer. Massiva eller breccierade lavabergarter är underordnade liksom amygdaloidförande och pisolitiska varianter. Kvarts- och fältspatporfyriska typer är mycket vanliga. De spilitiska basalterna uppträder mycket ojämnt fördelade i denna stratigrafiska nivå. De består vanligen av fältspatporfyriska lavar och tuffer. Ofta förekommer både lavabreccior, fragmenttuffer och finlaminerade tuffer och tuffiter. Denna bimodala vulkanitsekvens utgör avsättningsmiljön för de komplexa sulfidmalmen i Skelleftefältet.

Mellersta formationen domineras av epiklastiska och vulkanoklastiska sediment, avsatta dels i en lugn hemipelagisk miljö och dels i en turbulent ostadig miljö på en kontinentrand (Dumas 1985). Tillsammans med dessa sediment uppträder spilitiska basalter och ultramafiska vulkaniter som konforma tuffhorisonter, massiva och breccierade lavaflöden. Enstaka lokaler uppvisar pillow lavastrukturer. Dessa vulkaniter växlar mellan pyroxenporfyriska och fältspatporfyriska typer. Associerat uppträder ytliga intrusiv av likartade sammansättningar. Speciella typer av intrusivbergarter är associerade med nickel-

kopparmineraliseringar i södra Västerbotten (Nilsson 1985).

Den övre formationen utgörs av en vulkanisk serie med mafiska till sura produkter, varav huvuddelen avsatts under vatten. Basaltiska till andesitiska lavar och tuffer, ofta av fältspatporfyrisk typer, dominerar lokalt. Annorstädes dominerar kvarts-fältspatporfyrisk homogena och fragmentförande bergartstyper tillsammans med tuffer och tuffiter. Inom denna formation är massiva sulfidmalmerna ej kända. Impregnations- och brecciemalmer av koppar-guld, arsenikkis-guld samt svavelkis-guld är däremot allmänt förekommande.

Megastrukturer i Centrala Skelleftefältet

Geofysiska tolkningsarbeten av flygmagnetiska och gravimetriska data (Fig. 4) påvisar ett flertal "runda" strukturer och lineära dislokationer inom det centrala Skelleftefältet (opublicerad rapport Claesson m.fl. 1984). De runda strukturerna avspeglar i de flesta fall plutoniska intrusiv, som vid Gallejaur (1), Jörn (2) och i Revsundsområdet (3). "Intrusiva" mönster kan också orsakas av bl.a. interfererande veckning.

Massunderskottet över Malänäsfältet (4) har varit ett huvudproblem. Strukturen avgränsas genom gradienten till ett gravimeterminima om ca 50 gu. Minimat har en päronform, ca 13.5x8.5 km, med längdaxeln utsträckt i NNV. Ett centralt minima med centrum över Skäggträskberget, bildar en mindre struktur, ca 8.5x6.5 km. Underliggande granit av Revsunds- eller Jörngranitoidtyp kan vara en förklaring. En underliggande primär vulkanisk dom med stor volym av lätta, albitomvandlade, sura vulkaniter är en annan tolkning.

Ett intressant faktum är att flera av de större sulfidmineraliseringarna i området ligger i direkt anslutning till den större "lätta" strukturen. Exempel på detta är: Elvaberget, Mensträskmalmer, Västra och Östra Maurliden, Norra och Södra Norrliden. En förklaring till detta skulle kunna vara att den gravimetriska gradienten visar på ett snitt i den vulkaniska domen där det stratigrafiska läget varit lämpligt för malmavsättning.

Detta har ännu inte kunnat verifieras i fält. .

GEOLOGIN INOM MALÅNÄSFÄLTET

Geologin inom Malånäsfältet (Fig 1) har tidigare beskrivits av Gavelin (1939), med huvudvikt på den centrala delen. Hela Malånäsfältet antas tillhöra de äldsta vulkanit- och sediment-dominerande formationerna inom Skelleftegruppen. Flera geologiska delområden kan särskiljas Borup, Skäggträskberget, Önsusbäcken, Maurliden, Vargforsdammen, Norrliden-Bjurfors, Bjurliden-Bjurträsk, Snåttermyrans-Svansele samt Gradinsberget-Udden. Dessa utgör, vart och ett, ett delområde med speciella bergarter, malmtyper och strukturella särdrag.

Delområden inom projektområdet.

Borup: Detta område domineras av en massiv sur vulkanit, med talrik kvartsbrecciering och hydrotermalomvandlingsmönster. Övriga bergarter utgörs av pelitiska sediment ± grafit, basiska lavar och tuffer, tuffiter, sura pyroklastar samt en kalkstensbildning i sur vulkanit (Fig. 5).

Den enda kända mineraliseringstypen i detta område är arsenikkisförande kvartsgångar i både sura vulkaniter och pelitiska sediment.

Den strukturella tolkningen för detta delområde bygger på idén om en stor domstruktur (se ovan) som täcker hela projektområdet. Borup utgör den södra begränsningen på denna storstruktur. Här återfinns geologiska bevis för en expansiv fas i den massiva sura vulkaniten, vilken breccierats av sin egen kraft med bildning av kvarts-arsenikkis fyllda sprickor. Distalt uppträder bandade strata av tuffer, tuffiter och pelitiska sediment, där "graded bedding" ger uppåtangivelser mot mäktigare sedimentationsmiljöer. Den basiska vulkanismen bildas troligen relativt sent vid sprickerupptioner och ger blandade avsättningar både i de sura vulkaniterna och i sedimenten.

Skäggträskberget: Här dominerar sura fragmentförande vulkaniter som växellagrar med bandade sura tuffer och tuffit samt pelitiska till psamitiska sediment. Sent intrusiva grönstenar återfinns i enstaka hållar. Till detta kommer senare kvartsgångar med sulfidmineralisering som diskordant klipper både vulkaniter och sediment (Fig. 5).

De kända komplexa sulfidfyndigheterna som uppträder i detta område är Lappmössan och Ö. Högkulla (Tab. 1). Båda belägna stratigrafiskt relativt långt ner i de sura vulkaniterna och omgivna av lokala omvandlingszoner. Hela Skäggträskberget är präglad av stark hydrotermal påverkan.

Strukturtolkningen för detta område inkluderar ett utbrottscentra för den sura vulkanismen (eventuellt en subariel instörtningsskaldera, centralt belägen i den ovannämnda stora domstrukturen), med åtföljande små lokala sedimentbassänger och flera komplexa sulfidfyndigheter relaterade till bassänger och andra lämpliga avsättningsmiljöer. Fragmenten och de sura vulkaniterna är ofta skarpkantade och ojämna till storleken. De visar ytterst lite tecken på "spilitisering", dvs karbonat- och kloritomvandling. Detta kan tas som ett tecken på ett lokalt subariellt, eller i ytterst grunt vatten, utbrottscentra.

Önusbäcken: Dalgången mellan Skäggträskberget och Önusberget består av psamitiska, pelitiska och vulkanoklastiska sediment. Dessa utgör ett synformt läge mellan två vulkancentra och består delvis av mycket lokalt material. Talrika "load casts" och "graded bedding" ger uppåtbestämningar som verifierar denna tolkning. På Önusberget uppträder kvartsgångar med sulfidmineraliseringar av samma typ som på Skäggträskberget (Fig. 5).

Maurliden: Ett större område (4x6 km) med flera olika typer av sura fragmentförande vulkaniter utbreder sig mellan Önusbäcken och Vargforsdammen (Claesson 1984). Troligen representerar dessa explosionsbreccior av fältspat- respektive kvarts-fältspat-porfyriska vulkaniter, där fragmenten avrundats pga både mekanisk nötning och kemisk påverkan i vattenrik miljö. Lokala avvikelser i sammansättningen förekommer liksom mekanismen för dess avsättning och transport. Ställvis kan "debris flows" urskiljas. Vidare förekommer homogena och bandade tuffer av sur

jas. Vidare förekommer homogena och bandade tuffer av sur och intermediär karaktär, liksom homogena kvarts-fältspat- porfyriskas vulkaniter (Fig. 5). Fyra komplexa sulfidfyndigheter är kända inom Maurlidenområdet (Tab. 1), dessa uppträder i något olika faser av de sura vulkaniterna. Regional "spilitisering", dvs karbonat + kloritomvandling är mycket vanlig. Dessutom omges sulfidfyndigheterna av lokala omvandlingszoner.

Maurlidenområdet är beläget perifert till den stora domstrukturen, men ligger i fältstupningsriktningen av dess förlängning. De rikligt förekommande explosionsbrecciorna tyder på ett vulkaniskt aktivt område, troligen direkt relaterat till ett utbrottscentra för den sura vulkanismen i detta område. Detta delområde var troligen beläget under djupare vatten än området vid Skäggträskberget. Detta indikeras av högre "spilitiseringsgrad" och mindre våldsamma utbrott. Fragmenteringen av vulkaniterna är mera plastisk än rupturrell. Sulfidavsättningen har skett dels i lokala bassänger och dels i tektoniska zoner, vilka är relaterade till den vulkaniska aktiviteten.

Vargforsdammen: Området domineras av turbiditiska gråvackor, där sedimentära strukturer är vanliga ("slumping, crossbedding, debris flow, turbulent streams" osv). Dessa sediment är vulkanogena och återspeglar en stark släktskap med omgivande vulkanism. Bergarterna och strukturerna ger intryck av en mycket ostadig vulkano-sedimentär bildningsmiljö. Konformt i dessa sediment finns hög Mg-låg Ti basalter ("basaltiska komatiiter", Claesson 1985) i form av flöden eller ytliga lagergångar. Inga sulfidfyndigheter är kända i detta område (Fig. 5).

Den strukturella tolkningen bygger på geologiska observationer, som visar på ytterst primära deformationsmönster. Dessa återspeglar tillståndet vid bergarternas avsättning. Detta indikerar troligtvis synsedimentära blockförkastningar parallellt med randen till vulkandomen. De har givit upphov till en kraftig nedsänkning och en ackumulerande zon av vulkanogena sediment. Idag intar detta område ett synklinalt läge med yngre pålagrande sediment, alluviala och fluviala konglomerat, samt vulkaniska produkter från stratavulkaner längs detsamma. Dessa bildningar tyder på en senare regression, (dvs upphöjning av

området), och avsättning av subariella vittringssediment.

Norrliden-Bjurfors: Detta delområde ligger inom det centrala Malånäsfältet, där en starkt bimodal vulkanism uppträder. Beståndsdelen i denna består av kvarts-fältspatporfyriska vulkaniter, både bandade och homogena tuffer samt fragmentförande pyroklastiter. Spilitiska basalter till basaltiska andesiter uppträder som amygdaloida lavar, lavabreccior, bandade tuffer och fältspatporfyriska kumulat. Utöver dessa två vitt skilda litologiska enheter finns mixade faser exempelvis bergarter med bandad basisk matrix och sura fragment. Underordnat finns horisonter med grafitförande pelitiska sediment (Fig. 5). Inom området är två sulfidfyndigheter kända vid Norrliden (Tab. 1).

Områdets strukturella uppbyggnad kan eventuellt relateras till en synvulkanisk svaghetszon, vilken lokaliserat stora mängder av basisk vulkanism till detta område och flera sulfidfyndigheter. Geofysiska data pekar på en mängd cirkulära strukturer av intrusiv karaktär varav en med hög magnetisering. De ligger i ett E-W:ligt tektoniskt block. Området har ett stort massöverskott (ca 30 gu) som tolkats bestå av minst 650 meter mäktiga basiska vulkaniter i en lopolitstruktur (Claesson et al 1984). De utgör centrat för den basiska vulkanismen i centrala Malånäsfältet.

Komplexa sulfidförekomster inom projektområdet

Sulfidförekomsterna inom projektområdet (Tab. 1) utgörs av pyritdominerande kompakta och/eller impregnerade fyndigheter. De uppträder proximalt dels i förhållande till vulkaniska utbrottscentra och dels till en förmodad synvulkanisk svaghetszon (se ovan). Denna har även lokaliserat den basiska vulkanismen i centrala Malånäsfältet. Varierande mängd av zinkblände, kopparkis, blyglans och sulfomineral uppträder i fyndigheterna (Tab. 1). Halterna varierar starkt och är idag subekonomiska (Fig. 6 och 7). Guld och silver utgör viktiga ekonomiska komponenter av malmvärdet i dessa fyndigheter. Olika typer av omvandling i sidoberget förekommer, liksom omvandling av själva värdbergarten. Vanligast är dock någon typ av fragmentförande

sur vulkanit.

De vulkaniska bergarternas litogeokemiska karaktär

De vulkaniska bergarterna inom projektområdet har tidigare indelats i en mafisk och en felsisk grupp (Claesson 1985). De bildar alltså en tydligt bimodal sekvens (Fig. 8) med basalter-andesiter och ryodaciter-ryoliter av subalkalin karaktär. Den stora spridningen vid jämförelse med LFSV och LMSV (Claesson 1985) är förmodligen förorsakad av "spilitisering" och senare hydrotermal påverkan. Den bimodala karaktären förstärks ytterligare i ett TiO_2/Zr diagram (Fig. 9) där den mafiska gruppen visar en trend med svagt ökande Ti halt vid ökande Zr halt. Den felsiska gruppen visar en relativt homogen ansamling bortsett från några enstaka avvikande, ofta mineraliserade, prover.

Regional och lokal omvandling

Vid en jämförelse av Skelleftevulkaniterna med "normala" magmatiska bergarter enligt Hughes (1973) och Le Maitre (1976) (Fig. 10 a, b) förefaller de förra vara omvandlade. De sprider tvärs över den normala magmatiska differentiationstrenden och kan snarast benämnas Na-rika "spiliter" och "kvartskeratofyrer" samt K-rika "malmkvartsiter". Ett fåtal prov i detta diagram kan jämföras med normala basalter. Den svaga differentiations-trend som figur 9 anger för den mafiska gruppen, kan följas i Fig. 11 där proven följer en basaltisk till andesitisk trend dock med förhöjda Na halter. Här skall dock påpekas att proven med de högsta Ti, Zr-respektive de lägsta Ca-halterna, tagits nära mineraliseringar. Dessa är sålunda silificerade basalter ($>60\% \text{SiO}_2$) snarare än andesiter.

Ett omvandlingsindex ($\text{A.I.} = \text{MgO} + \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}$) efter Hashiguchi et al (1983) har prövats. Det antas återspegla fältspatens omvandling relativt väl.

Detta mineral är vanligt förekommande både i mafiska och felsiska bergarter inom projektområdet. Den mafiska gruppen (Fig.

12) visar en relativt liten spridning (19-46) med avseende på detta index, bergarterna är alltså Na-anrikade spiliter. De flesta elementen inklusive Zr, Y och REE_{TOT} visar relativt stor mobilitet, de sprider vid konstant A.I. Enstaka element som Mg, Ca, och K visar dock bra korrelation till A.I.

De felsiska bergarterna (Fig. 13) återger en spridning över hela A.I. skalan. Både Na-anrikade prover (A.I. <50) och K-Mg-anrikade prover (A.I. >50) finns. De flesta elementen för denna grupp visar en god korrelation till A.I. Däremot är endast ett fåtal element relativt stabila vid omvandling relaterad till detta index (Ti, Al, Y, Zr, La och REE_{TOT}). Försök har gjorts att med hjälp av detta A.I. definiera bergartssammansättningar som är mindre påverkade av geokemisk omvandling.

De minst påverkade bör ligga runt A.I. = 50. Enligt Fig. 12-13 är detta ej särskilt rättvisande vare sig för de mafiska eller för de felsiska proven. Försök gjordes att använda medelvärdet ($\bar{X}$), för hela den felsiska gruppen (Fig. 13a). Detta ger missvisande värden för några element (Si, Na, Fe). Vidare testades prover med A.I. ~ 50 mot mikroskoperingsresultat med negativt resultat. De felsiska proven som mineralogiskt syns mest välbevarade är alla grova kvarts-fältspatporfyrier. Enligt fältobservationer och det texturella utseendet kan dessa typer av vulkaniter stundtals räknas till subvulkaniska faser. Sådana faser deltar ej lika aktivt i regionala respektive hydrotermala omvandlingsprocesser (Stephens 1980).

För att definiera sammansättningen på en "frisk" felsisk bergart i detta område (Tab. 2) har följande fyra parametrar använts. Na₂O/CaO förhållandet skall vara mellan 1 och 3. Na₂O och CaO halterna skall vara ungefär 3.5-3.7 % Na₂O respektive 1.5-4.5 % CaO (ryolit-dacit). Proven bör ligga inom "Hughes igneous spectra" samt vara grovporfyrisk kvarts-fältspatporfyrier. Av detta framkom sju prover, som markerats i Fig. 10 och 11, vars medelvärde definierar en "frisk" felsisk bergart (Tab. 2).

För att erhålla sammansättningen på en "frisk" mafisk bergart,

dvs den minst påverkade, har A.I. kontrollerats men befunnits vara mindre användbar än följande kriterier. I Fig. 10 och 11 kan fyra prover separeras, som relativt väl anslutande till en basaltisk sammansättning. Dessa fyra provers medelvärde får bilda den "friska" mafiska bergarten i denna undersökning (Tab. 2).

Kemiska förändringar

Medelvärdet för de Na-anrikade och K-Mg-anrikade populationerna av mafiska respektive felsiska vulkaniter har jämförts med sammansättningen för de "friska" ekvivalenterna (Tab. 2).

Resultaten av jämförelse mellan den "friska" felsiska bergarten och de Na-anrikade felsiska vulkaniterna ger vid handen att urlakning ($F_{A-U} < 80$) skett framförallt av Ca, K, Ba, Cr, Rb och Zr. Stark anrikning ($F_{A-U} \geq 120$) i denna population har skett för Na, Cu och Zn. Av REE elementen har Eu anrikats och övriga urlakats.

I den K-Mg-anrikade provgruppen har stark anrikning ($F_{A-U} \geq 120$) skett för Si, Al, Fe, Mg, K, Ba, Cu, Zn, Y, Li, Ni, Pb, Rb, Sc, V och Co. Denna grupp har urlakats ($F_{A-U} < 80$) på Ca, Na och Sr. Samtliga REE elementen har anrikats inom denna grupp. Dessa resultat kan till viss del jämföras med resultaten från vulkaniska serier som utsatts för hydrotermal omvandling under havsbotten (Iijima 1974).

Den Na-anrikade mafiska gruppen visar förutom Na även Ba, Ni och Zr anrikning samt urlakning av Al, Fe, Mg, Ca, K, Cu, Zn, Sc, Sr, V och Co. Övriga element inklusive REE är relativt stabila.

En annan metod för att utröna kemiska förändringar har provats, nämligen SIMCA. Detta dataprogram bygger på en multielementsanalys som åskådliggörs i grafiska plottningar (Bil. 1). Metoden har visat sig användbar, men har i denna studie endast prövats ytligt. Bättre resultat bör erhållas om provpopulationerna uppdelas mer och om uppföljning av erhållna kemiska skillnader

sker med hjälp av tunnslipen i en specialstudie. Härvid bör såväl intressanta prover som element erhållas med tanke på sulfidmalmsförande system.

Klassificering av de vulkaniska bergarterna

Som framgår av ovan beskrivna kemiska förändringar, så har de flesta av områdets vulkaniska bergarter genomgått en "spilitisering". Enligt vad som framgår av figur 8 så bör de mest "friska" mafiska bergarterna benämnas subalkalina basalter medan övriga kallas spilit. De höga SiO_2 -halterna i vissa basalter beror på silicifiering nära malmer.

De mest "friska" inom den felsiska gruppen bör kallas subalkalina ryoliter och de övriga för kvartsskeratofyrer. Den bimodala fördelningen förstärks då omvandlingen skalats bort.

För att bestämma karaktären på dessa båda grupper har FeO^* och SiO_2 plottats mot differentiationsindex FeO^*/MgO (Fig. 14). Här används bara de minst omvandlade basalterna och ryoliterna. Trots det måste resultaten behandlas med försiktighet pga dessa elements mobilitet. Den basaltiska gruppen följer en tholeiitisk trend, enligt definitionen som Gill (1981) och Miyashiro (1974) angivit, medan ryoliterna följer en kalkalkalin trend. I figur 15 har REE elementen normaliserats mot en chondritisk standard (L-6). Här framgår att dessa element är stabila mot omvandling, i synnerhet inom den felsiska gruppen. De primära skillnaderna mellan grupperna är också i överensstämmelse med tidigare bevis.

REE elementen visar, för den felsiska gruppen en anrikning av de lätta REE elementen (LREE) (La-Sm) gentemot de tunga REE elementen (HREE) (Gd-Lu). Dessutom har Eu urlakats. Den totala summan REE_{TOT} är för den "friska" ryoliten 108 ppm i medelvärde och La_N/Yb_N (där N står för normalisering) förhållandet är 3.0.

Den mafiska gruppen visar likaså en anrikning av de lätta REE elementen (LREE) (La-Sm) gentemot de tunga REE elementen (HREE)

(Gd-Lu), men betydligt mindre än för den felsiska gruppen. La_N/Yb_N förhållandet (2.5) är också lägre i den mafiska gruppen. Medelvärde av den totala summan REE_{TOT} för den "friska" basalten är 44 ppm alltså betydligt lägre än för den friska ryoliten. Eu anomalien saknas i den mafiska gruppen.

I Wilson et al (in prep) har (4) bergartsfaser (GI-GIV) beskrivits från Jörngranitmassivet, GI-fasen är äldst och GIV-fasen yngst. Som jämförelse i denna studie har (4) stycken prover från Jörngranitmassivet plottats med avseende på REE elementen (Fig. 16 a). Här framgår hur lika den äldsta GI-fasen av Jörnmassivet och ryoliterna är med avseende på REE elementen. Exakt samma mönster uppträder med anrikning av de lätta REE elementen (LREE) (La-Sm) gentemot de tunga REE elementen (HREE) (Gd-Lu), negativ Eu anomali samt La_N/Yb_N förhållandena 4.1 (Jörn GI-4) och 3.0 (ryolit). Dessutom synes hur GII, GIII respektive GIV faserna inom Jörnmassivet är mera fraktionerade och urladdade på de tunga elementen (Gd-Lu). Den negativa Eu anomalien försvinner och La_N/Yb_N förhållandet 12.3 (GII-12), 20.5 (GIII-15) och 32.8 (GIV-20) ökar markant.

Vidare har ett medelvärde för (8) hög Mg-låg Ti basalter från den yngre sedimentdominerande formationen plottats. (Fig. 16b). Just dessa prover är från Vindelgranseleområdet men företer stora likheter med basalter i Malänäsområdets sedimentformation.

Jämförelsen mellan de olika basalterna (Fig. 16 b) ter sig också mycket likartade med flacka lutningar och avsaknaden av Eu-anomalier. La_N/Yb_N förhållandena (2.5) respektive (5.8) visar på högre grad av fraktionering av sedimentformationens basalter.

Tektonisk bildningsmiljö

De basaltiska bergarterna i Malänäsfältet uppvisar en tydlig likhet med basalter bildade i ett vulkaniskt bälte relaterat till en subduktion zon (VAB). Detta är helt i överensstämmelse med den regionala studien av Claesson (1982, 1985). Dessa anta-

ganden bygger på litogeokemiska plottningar enligt Pearce (1975, 1982), av de i basalter relativt stabila elementen Ti-Cr-Y-Zr. De ryolitiska bergarterna har i Claesson (1985) med hjälp av Ti-Zr halterna jämförts med "ARC lavas" enligt Pearce (1982).

Ett multielementdiagram enligt Pharaoh och Pearce (1984) (Fig. 17) innehåller bland annat LIL (large ion lithophile) elementen (Sr, K, Rb, Ba), vilka kan vara mycket mobila vid hydrotermal påverkan. Men övriga element i denna plottning förefaller att vara relativt stabila. Tolkningen är dessutom mest kritisk för elementen Th till Yb.

Basalterna från Malånäset, liksom stratigrafiskt ekvivalenta prover (Fig. 17a), liknar ett mellanting mellan "island arc tholeiites" och "calc-alkaline basalts of an island arc character" (Pharaoh och Pearce 1984). Basalterna visar sålunda anrikning av elementen Sr till Th relativt till de övriga plottade elementen. Dessa element har dock varit relativt mobila i denna grupp. Den allmänna lakningen av elementen Zr till Cr liknar mest mönstret hos "island arc tholeiites".

För ytterligare jämförelse har (4) hög Mg-låg Ti basalter, "Komatiitiska basalter" (Claesson 1985) från den yngre sedimentformationen plottats (Fig. 17 b). Dessa prover är från Vindelgranseleområdet (se ovan). Basalterna i denna grupp visar också anrikning av elementen Sr till Th relativt övriga plottade element, men de skiljer sig genom att vara något anrikade på Ta, Nb och Sm. Liknande mönster företas av kalkalkalina basalter från både "island arc" och "continental arc" samt i någon mån även av "continental tholeiites" (Pharaoh och Pearce 1984).

I sedimentområdena i Skelleftefältets randzon uppträder en grupp "high Fe tholeiitic basalts". Dessa har en MORB eller "within-plate basalt" karaktär (Pharaoh och Pearce 1984), samt (Claesson in prep.).

DISKUSSION

Tektonisk bildningsmiljö

De litogeokemiska studierna av Malänäsfältets vulkaniter ger samstämmiga indicier med Claesson (1985) på den tektoniska miljön vari den bimodala ryolit-basaltformationen bildades. Både ryoliter och basalter visar bra överensstämmelse med "arc lavas" i Ti-Zr diagram. För basalterna erhöles liktydiga, "volcanic arc basalts" resultat med hjälp av Ti-Cr och Cr-Y plottningar.

Inom gruppen "volcanic arc basalts" ryms både "island arc tholeiites" och "calc alkaline basalts". Med hjälp av multielementdiagrammet, (efter Pharaoh och Pearce, 1984), så kan dessa grupper separeras relativt väl. Detta diagram (Fig. 17a) tycks favorisera en "island arc tholeiites" karaktär för basalter både från Malänäsfältet och dess ekvivalenter från övriga delar av Skelleftefältet.

Enligt Vivallo (1985a) företräder basalterna från den sulfidmalmsförande bimodala vulkanitformationen i Boliden-Långdalområdet en "volcanic arc tholeiites" karaktär. Basalter i Kristinebergområdet visar en mera oklar bildningsmiljö medan de andesitiska bergarterna visar likheter med "orogenic andesites" avsatta i "island arcs" som uppträder på väl utvecklad kontinental skorpa eller på en tunn kontinentalrand (Vivallo 1985b). Vivallo antar vidare att båda dessa områdens bimodala vulkanitformationer är subduktionsrelaterade "volcanic arc settings". I den nu aktuella rapporten visas dessutom att basalter i den stratigrafiskt yngre sedimentformationen antyder en fortsatt uppbyggnad av "the Skellefte volcanic arc system".

Enligt Pharaoh och Pearce (1984) finns typiska "within plate basalts", dvs hög Fe-Ti basalter. Detta kan konfirmeras samt stärkas med iakttagelser från andra delområden i sedimentformation. Basalter finns med både MORB och "within plate basalts" karaktär (Claesson in prep).

I Claesson (1985) ansågs basalterna i sedimentformationen utgöra en övergångsfas mellan "volcanic arc basalts" (Ti-Zr,

Cr-Y) och "mid-ocean ridge basalts" (Ti-Cr). Somliga av basalterna i den studien är emellertid starkt fraktionerade, vilket troligen förklarar det höga Cr innehållet och likheten med "mid-ocean ridge basalts" i Ti-Cr diagrammet. Men som ovan angivits finns bergarter med tydlig "rifting" karaktär i sedimentformationen som är yngre än den sulfidmalmsförande Skelleftevulkanismen.

Magmatisk utveckling

Den magmatiska utvecklingen av vulkanismen i Malånäsfältet tycks följa mönstret för Skelleftefältet i stort (jmf Claesson 1985 och Vivallo 1985a+b). Vulkanismen i den lägre delen av stratigrafien är starkt bimodalt fördelad (Fig. 8 o 9) och består av en felsisk grupp med mer välbevarade ryoliter och mer omvandlade kvartsskeratofyrer samt en mafisk grupp med relativt välbevarade basalter och mera omvandlade spilitiska dito (Fig. 10 och 11).

Avsaknaden av en linjär differentiationstrend i t.ex $\text{SiO}_2\text{-Zr/TiO}_2$ diagrammet (Fig. 8) och $\text{TiO}_2\text{-Zr}$ diagrammet (Fig. 9), antyder olika ursprungsmaterial för ryoliter och basalter i denna formation.

De mest välbevarade, med avseende på hydrotermalomvandling, vulkaniterna från respektive grupp, anger en kalkalkalin trend för de ryolitiska vulkaniterna och en svagt tholeiitisk trend för de basaltiska vulkaniterna (Fig. 14).

Jämförelsen mellan de stratigrafiskt olika basaltgrupperna ger klara besked om en genetisk koppling dem emellan. REE elementen (Fig. 14) liksom multielementsdiagrammet (Fig. 17) visar på en starkt och en svagt fraktionerad grupp med enhetlig differentiationstrend. Denna trend har i Claesson (1985) jämförts med en tholeiitisk till komatiitisk trend. Det bör påpekas att de två grupperna av basalterna hör samman genetiskt men utgör två skilda stratigrafiska enheter. Den mest primitiva gruppen ligger stratigrafiskt överst, dvs är yngst.

REE elementens kurvor (Fig. 16) tyder på att plagioklaskristal-

lisation varit en styrande faktor. Den relativt branta lutningen av kurvorna för basalter och avsaknaden av Eu urlakning visar att ursprungsmaterialet till dessa vulkaniter tillkommit genom partiell uppsmältning av ett mantelmateriäl, som var anrikat på de lätta REE elementen (LREE) samt i avsaknad på Eu anomali.

Resultaten av REE elementens jämförelse mellan ryoliter och Jörngranitoider (Fig. 16b) ger övertygande bevis för en genetisk koppling dem emellan. Dessa bergarter har ej bildats genom fraktionerad kristallisation av de ovan beskrivna basaltiska enheterna. Trots detta utgör de troligen produkter av partiellt uppsmält mantelmateriäl, vilket varit starkt anrikat på de lätta REE elementen (LREE) samt kraftigt urlakat på Eu. Isotopstudier av granitmaterialet tyder på en kort krustaltid för detta materiäl (Wilson et al in prep, 1986).

Regional och lokal omvandling

En jämförelse av denna studie och studier av Vivallo (1985 a+b) antyder att den blandade vulkanitsekvensen (som är sulfidmalmsförande i Skelleftefältet) i mer eller mindre grad har utsatts för stark regional och lokal omvandling.

I den felsiska gruppen av Malänäsfältets vulkaniter har vid regionalomvandling, urlakning framförallt skett av Ca, K, Ba, Cr, Rb, Zr medan Na anrikats. Den mafiska gruppen har vid samma process urlakats på Al, Fe, Mg, Ca, K, Cu, Zn, Sc, Sr, V, Co och anrikats på Na, Ba, Ni, Zr.

Spiliter och kvartskeratofyter har beskrivits av många författare (se Amstutz 1974) :

1. De består av en lågtemperatur (grönskifferfacies) omvandlingsmineralogi som ersätter en mera typisk basaltisk till andesitisk respektive dacitisk till ryolitisk sammansättning.
2. De visar vanligen en Na-anrikning samt en kompletterande

Ca-K urlakning vid jämförelse med ursprungliga sammansättningar på basalter, andesiter respektive daciter och ryoliter.

Termen spilitisering kan användas för att beskriva den process som leder till bildningen av både spiliter och kvartskeratofyrer. Vanligtvis hänförs denna omvandling (spilitiseringen), till havsvattenpåverkan vid låg temperatur och i havsbottenmiljön.

Resultaten av den regionala omvandlingen som har påverkat vulkaniterna i Malånäsfältet kan med hjälp av ovan beskrivna process kallas spilitisering, dvs basalter omvandlas till spilitiska bergarter och ryoliter omvandlas till kvartskeratofyriska dito.

En starkt lokal omvandlingsprocess har därefter drabbat delar av den felsiska gruppen, med stark anrikning av Si, Al, Fe, Mg, K, Ba, Cu, Zn, Y, Li, Ni, Pb, Rb, Sc, V, Co och REE. Vulkaniterna har samtidigt urlakats på Ca, Na och Sr. Den mafiska enheten tycks helt sluppet denna typ av omvandling. Detta kan bero dels på provtagningen och dels på att dessa bergarter är belägna högt upp i denna stratigrafiska formation. I närheten av några sulfidfyndigheter inom Malånäsfältet finns dock metamafiter med lokal hydrotermalomvandling.

Extremt omvandlade bergarter inom denna grupp utgörs av klorit- respektive sericit-kvartsrika faser, vilka utgör "stringer-zones" direkt i anslutning till Cu-Zn fyndigheter respektive Zn-Pb-Cu fyndigheter.

I enlighet med exempelvis omvandlingsprocesser runt Kurokofyndigheterna (Iijima 1974) så kan ovanstående kemiska förändringar tillskrivas ett hydrotermalt systems påverkan av berggrunden stratigrafiskt under kompakta och disseminerade sulfidfyndigheter. I Kurokofyndigheternas värdbergarter har ofta Mg+K anrikats kraftigt i klorit respektive sericitrika zoner, medan Ca + Na urlakats.

Malmbildning

Olika teorier har framförts angående malmbildningen i Skelleftefältet. Högbom (1928) och Gavelin (1953, 1959, 1976) hävdade en malmbildning förorsakad av granitintrusioner. Lilljeqvist (1972) talade om vulkaniskt exhalativ malmbildning liksom Rickard och Zweifel (1975) gjorde. Mitchell och Bell (1973) jämförde Mensträskmalmer med "Besshi type in a destructive plate margin setting", medan Edelman (1977) förfäktade intrusiva sulfidmalmer. Vivallo (1985a+b) föreslår ett rift relaterat vulkaniskt exhalativt bildningssätt.

Med hjälp av "fluid inclusion" studier har Broman (1984) visat att avsättningen av zinkblände i Ö. Högkulla malmer skett vid temperaturer mellan 260–290 °C. Broman uppger (in prep) att malmer i Kristinebergfältet avsatts på mer än 1000 meters djup under havsnivån.

Av beskrivna kemiska förändringar i samband med regional respektive lokal omvandling så tycks en vulkanogen exhalativ process vara den verksamma malmbildningsprocessen för Malånsfältet liksom tidigare föreslagits för övriga Skelleftefältet (Lilljeqvist 1972, Rickard och Zweifel 1975).

Den exhalativa processen består troligen av ett hydrotermalsystem som drivs av en lämplig värmekälla och som urlakat de malmbildande elementen plus andra viktiga beståndsdelar från omgivande bergarter.

En möjlig värmekälla för att effektivt driva det hydrotermala systemet, är den rikligt tilltagande mafiska och ultramafiska magmatismen på djupet. Densamma har senare intruderat i den stratigrafiskt yngre sedimentformationen och visar tecken på "rifting of the Skellefte volcanic arc".

Värmekällan har drivit den förmodade konvektionscell som förorsakat en regional spilitisering av vulkaniterna och tillfört stora mängder av t.ex. Cu, Zn och K, Mg till en havsvattenrik vätska. Detta system har därefter kanaliserat flödet av den metallrika vätskan till gynnsamma lokaliseringssmiljöer, t.ex. synvulkaniska förkastningar, instörtningsskalderor, sedimentbas-

sänger o.dyl. Sulfidutfällning har skett på havsbotten och i andra lämpliga kemiska miljöer dit den metallrika vätskan pumpats.

Teorin som ovan beskrivits är den allmänt accepterade för flertalet av vulkaniskt associerade komplexa sulfidmalmer (Franklin et al 1981).

SLUTSATSER

Den tydligt bimodala fördelningen av vulkaniter i de sulfidmalmsförande delarna av Skelleftefältet har av Vivallo (1985a+b) tagits som ett tydligt tecken på "rifting". Han anger att förekomsten av komatiitiska gångar och pyroklastiter, vilka relaterats till "pre-ore basalts" kan utgöra ett mera utvecklat stadium av en redan pågående "spreading".

Bimodal vulkanism, behöver inte betyda att "rifting" pågår. I en subduktionszon är miljön kompressiv. Diapirer bildas av partiellt uppsmält mantelmateriel som stiger genom skorpan och skapar tension. Härigenom sker uppsprickning och lämplig miljö för extrusiva (= vulkaniska) faser bildas liksom genetiska plutoniter som intruderar i senare skede.

De geokemiska analyserna av de bimodala vulkaniterna och Jörn-granitoiderna i Skelleftefältet, pekar entydigt på subduktionsrelaterade kalkalkalina och tholeiitiska bergarter, vilka bildas i en kompressiv miljö, men avsatts i en tensionsfas av densamma. Under den påföljande sedimentationen har hög Mg-låg Ti basalter av komatiitisk karaktär liksom hög Fe-Ti basalter av tholeiitisk karaktär avsatts tillsammans med genetiska subvulkaniska intrusiv. Den första basalttypen antyder troligen en fortsatt utveckling av "the Skellefte volcanic arc" medan den senare basalttypen tyder på en "rifting" eller påbörjad "spreading" av densamma.

Den basaltiska och ultramafiska magmatismen som avsatts i denna "rifting" eller "spreading" situation, utgör troligen den värmekälla, som är den stora drivkraften för den hydrotermala

verksamheten i Skelleftefältet. Sulfidmalmsbildningen har förmodligen skett genom urlakning av bl.a. Cu och Zn ur den äldre vulkanitsekvensen vilka under en senare period avsatts i lämplig miljö ofta nära gränsen till sedimentformationen.

Figurer

1. Berggrundsgeologisk karta över Malånäsfältet.
2. Berggrundsgeologisk översiktskarta över Skelleftefältet med projektområdet inritat.
3. Modifierat stratigrafischema efter Lundberg (1980) för Skelleftefältet.
4. Storregionala dislokationssystem och "runda" strukturer.
5. Litologiska enheter i delområdenas stratigrafier.
6. Förhållandet Cu-Pb-Zn i atomprocent för sulfidfyndigheter i Skelleftefältet. Fyllda ringar detta arbete, plus tecken efter Rickard och Zweifel (1975), skuggat område efter Stanton (1972) för "sulfide deposits of marine and marine-volcanic association of global distribution".
7. Förhållande Pb-Zn i viktsprocent för sulfidfyndigheter i Skelleftefältet. Fyllda ringar detta arbete, plustecken efter Rickard och Zweifel (1975), öppna ringar efter Stanton (1972) för "sulfide deposits of marine and marine-volcanic association".
8. SiO_2 -Zr/ TiO_2 diagram efter Winchester och Floyd (1977). LFSV = Lower Felsic Skellefte Volcanic, LMSV = Lower Mafic Skellefte Volcanics, MMSV = Middle Mafic Skellefte Volcanics från Claesson (1985).
9. TiO_2 - Zr diagram.
10. "Hughes igneous spectra" efter Hughes (1973) med medelvärden för bergarter efter Le Maitre (1976).

11. Na_2O -CaO diagram med medelvärden för bergarter efter Le Maitre (1976) och "spilitlådan" efter Stephens (1980).
12. Element - A.I. diagram för "mafic rocks".
13. Element - A.I. diagram för "felsic rocks".
14. FeO^* , SiO_2 - FeO^*/MgO diagram med skiljelinjer mellan "tholeiitic" och "calc alkaline" efter Miyashiro (1974) och Gill (1981).
15. Chondrit normaliserade REE elements diagram m.a.p. mer eller mindre omvandlade vulkaniter.
16. Chondrit normaliserade REE elements diagram m.a.p. magmatiska grupper.
17. MORB normaliserat multielementsdiagram efter Pharaoh och Perce (1984).

Tabeller

1. Sulfidförekomster inom projektområdet.
2. Medelvärdet av "friska" respektive mera omvandlade vulkaniter samt anriknings-urlakningsfaktorn (F_{A-U}).

Bilagor

1. Omvandlingar och dess kemi, en SIMCA-analys av bergarter från Malänäsfältet.

Litteraturförteckning

Amstutz, G.C. (ed), 1974: Spilites and spilitic Rocks.
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.

- Adamek, P.M. och Wilson, M.R., 1979: The evolution of a uranium province in northern Sweden. *Philos. Trans. Soc. London, A* 291, pp. 355-68.
- Broman, C., 1984: A preliminary study of fluid inclusion in sphalerite from the Östra Högkulla mine. Skellefte District, Sweden. Abstract 16 e Nordiska Geologiska Vintermötet Stockholm 9-13 jan 1984. *Medd. från Stockholms univ. Geol. Inst. Nr 255.* 40.
- Broman, C. (in prep): Fluid inclusions of the massive sulfide deposits in the Skellefte district. Sweden.
- Claesson, L-Å., 1982: Stratigraphy and petrochemistry of the ore-bearing Skellefte Group volcanites. *GFF* 104, pp. 378-9.
- Claesson, L-Å., 1984: Geologisk tolkning av Maurlidenområdet: Delrapport 1. STU-rapport. PRAP 84021.
- Claesson, L-Å. (In prep.): Mafic and ultramafic magmatism generated through arc-rifting and its relation to the formation of the volcanogenic massive sulphide deposits in the Skellefte district, northern Sweden.
- Claesson, L-Å., 1985: The geochemistry of early Proterozoic metavolcanic rocks hosting massive sulfide deposits in the Skellefte district, northern Sweden. *J. Geol. Soc. London, Vol. 142*, pp. 899-909.
- Claesson, L-Å., Isaksson, H., och Ullberg, A., 1984: Regional utvärdering av kartbladen 23J Norsjö SV.SO. SGAB, PRAP 84049.
- Dumas, H., 1985: Sedimentary lithofacies in the central part of the Skellefte District. Unpubl. report at Högskolan i Luleå.
- Du Rietz, T., 1953: Geology and ores of the Kristineberg deposit, Västerbotten, Sweden. *SGU Ser. C No 524.*

- Edelman, N., 1977: Intrusive sulfide ores in the Skellefte district. GFF., Vol. 99, pp. 127-9.
- Eklund, J., 1923: Skelleftefältets geologi. Ref. GFF., Bd 45, pp. 216-19.
- Eklund, J., 1924: Skelleftefältets sulfidmalmsförekomster. I "Tegengren m.fl. Sveriges ädlare malmer och bergverk. SGU, ser. Ca, nr 17.
- Franklin, J.M., Lydon, J.W., och Sangster, D.F., 1981: Volcanic-associated massive sulfide deposits. Econ. Geol. 75 th Anniversary Volume, pp. 488-627.
- Gavelin, A., 1923: De nya sulfidmalmsfyndigheterna i Västerbottens län. Tekn. Tidskr., Vol. 538, pp 13-20.
- Gavelin, A., 1924: Resultaten av de malmgeologiska undersökningarna inom Västerbottens län. Geol. Fören. Förh., Vol. 45, pp. 216-219.
- Gavelin, A., 1926: Om undersökningarna rörande sulfidmalmer i Västerbottens län. Blad för berghanteringen vänner. Örebro 1926, pp. 245-284.
- Gavelin, S., 1939: Geology and ores of the Malånäs District. SGU ser. C No 424.
- Gavelin, S., 1942: Relations between ore deposition and structures in the Skellefte District. SGU Ser. C No 443.
- Gavelin, S., 1943: On the distribution of metals at Rävliiden, N. Sweden, and in other copper-zinc ores. SGU Ser. C No 454.
- Gavelin, S., 1948: Adakområdet. SGU Ser. C, No 490.
- Gavelin, S., 1953: Die Beziehungen zwischen Sulfidvererzung und Granitbildung im Skelleftefeld, Nordschweden. Geol. Rundschau Bd 42.

- Gavelin, S., 1955: Sulphide mineralization in the Skellefte District, N. Sweden, and its relation to regional granitization. *Econ. Geol.* Vol. 50, pp. 814-831.
- Gavelin, S., 1955: Beskrivning till berggrundskarta över Västerbottens län. *SGU Ser. Ca*, No 37.
- Gavelin, S., 1959: Malmgenes, *GFF Bd* 81.
- Gavelin, S., 1976: Discussion. Genesis of Precambrian sulfide ores, Skellefte District, Sweden. *Econ. Geol.* Vol. 71, pp. 672-674.
- Gavelin, S., Grip, E., 1946: Skellefte- och Arvidsjaurfälten. *GFF*, Bd 68, pp. 152-170.
- Grip, E., 1942: Die Tektonik und Stratigraphie der zentralen und östlichen Teile des Skelleftegebietfeldes. *Bull. Geol. Inst. Uppsala*, Vol. 30, pp. 67-90.
- Grip, E., 1946: Arvidsjaurfältet och dess förhållande till omgivande berggrund. *SGU Ser. C*, No 474.
- Grip, E., 1951: Geology of the sulphide deposits at Mensträsk and a comparison with other deposits in the Skellefte District. *SGU Ser. C*, No 515.
- Grip, E., 1961: Geology of the nickel deposit at Lainijaur in N. Sweden. *SGU Ser. C*, No 577.
- Grip, E., 1973: "Skelleftefältets sulfidmalmer", *Malm i Sverige 2* (Grip, E., Frietsch, R), Almquist & Wiksell, Stockholm.
- Grip, E., Wirstam, Å., 1970: The Boliden Sulphide Deposit. *SGU Ser C Nr* 651.
- Gill, J., 1981: *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Springer Verlag, Berlin.

- Hashiguchi, H., Yamada, R. and Inoue, T., 1983. Practical application of low Na_2O anomalies in footwall acid lava for delimiting promising areas around the Kosaka and Fukozawa Kuroko deposits, Akita Prefecture, Japan. Econ. Geol. Mono. 5, pp. 387-394.
- Helfrich, H.K., 1971: Stratigraphie, Tektonik, Petrographie und montangeologische Züge am Nordrand der Norrlandsgeosynklinale. SGU Ser. C, No 654.
- Hietanen, A., 1975: Generation of Potassium-Poor magmas in the Northern Sierra Nevada and the Svecofennian of Finland. Jour. Res. U.S. Geology. Survey. Vol. 3, No 6, pp. 631-645.
- Högbom, A.G., 1899: Skelleftefältets geologi och bergarter. Ref. GFF, 21, pp. 636-38.
- Högbom, A.G., 1910: Precambrian Geology of Sweden. Bull. Geol. Inst. Upsala, Vol. 10, pp. 1-80.
- Högbom, A.G., 1928: On the relations between syntectonic granites and ore-formation in Sweden. Fennia 50, No 21.
- Högbom, A.G., 1931: Nya iakttagelser inom Norr- och Västerbottens urberg. GFF Bd 53, pp. 415-438.
- Högbom, A., 1937a: Skelleftefältet med angränsande delar av Västerbottens och Norrbottens län. SGU Ser. C, No 389.
- Högbom, A., 1937b: Åldersindelning av Västerbottens och södra Norrbottens urberg. GFF Bd 59.
- Hughes, C.J., 1973: Spilites, keratophyres, and igneous spectrum. Geological Magazine 109, pp. 513-527.
- Iijima, A., 1974: Clay and zeolitic alteration zones surrounding Kuroko deposits in the Hokuroku district, northern Akita, as submarine hydrothermal-diagenetic alteration products. Society of Mining Geologists Japan, special

issue 6, pp. 267-289.

Kautsky, G., 1956: Skelleftefältets stratigrafi och geologiska historia. GFF Bd 78.

Kautsky, G., 1957: Ein Beitrag zur Stratigraphie und dem Bau des Skelleftefeldes, Nordschweden. SGU Ser. C, No 543.

Kautsky, G., 1959: Studien zur Paläogeographie des Archaikum im nördlichen Sweden. GFF Bd 81.

Kautsky, G., Quensel, P., Åhman, E., Frietsch, R. och Geijer, P., 1960: Archean geology of Västerbotten and Norrbotten, northern Sweden., Int. Geol. Congr. 1960.

Le Maitre, R.W., 1976: The chemical variability of some common igneous rocks. J. Petrol., 17, pp. 589-637.

Lilljequist, R., 1972: Några reflektioner kring tillkomsten av Skelleftefältets malmer. Bergbladet, Årgång 29, nr 4, pp 11-14.

Ljung, S., 1974: Adak-Lindsköld-Brännmyrangruvorna inom Adak-fältet. Petrografi och malmer. SGU Ser C No 701.

Lundberg, B., 1980: Aspects on the geology of the Skellefte field, northern Sweden. GFF 102, pp 156-66.

Miyashiro, A., 1974: Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. Am. J. Sci. 274, pp. 32-55.

Mitchell, A.M.G. och Bell, J.D., 1973: Island arc evolution and related mineral deposits. J. Geol. Chicago, 81, pp. 381-405.

Nilsson, G., Lundberg, B., Papunen, H., 1985: Ni-deposits in Sweden. In: Papunen, H., and Gorbunov, G.I. (Eds), Ni-Cu-deposits of the Baltic shield. Geol. Surv. Finl. Bullentin.

- Pearce, J.A., 1982: Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: THORPE, R.S. (ed). Orogenic Andesites. J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 525-48.
- Pharaoh, T.C. and Pearce, J.A., 1984: Geochemical evidence for the geotectonic setting of early Proterozoic metavolcanic sequences in Lapland. Precambrian Res. 25, pp. 283-308.
- Rickard, D.T. 1979: Scandinavian Metallogensis. Geojournal 3, pp. 235-52.
- ____ Rickard, D.T., 1982: The origin of Skellefte field type ores: An overview. GFF 104, pp. 370-1.
- Rickard, D.T., and Zweifel, H., 1975: Genesis of Precambrian Sulfide Ores, Skellefte District, Sweden. Econ. Geol., v. 70, pp. 255-274.
- Rickard, D. T., and Svensson, S-Å., 1984: Ore lead isotope variations in the Proterozoic massive pyrite deposit at Näsliden, Skellefte district, Sweden. Mineralium dep. 19, pp. 145-51.
- Stanton 1972: Ore petrology: New York, McGraw-Hill, 713 p.
- Stephens, M.B., 1980: Spilitization, element release and formation of massive sulphides in the Stekenjokk Volcanites, Central Swedish Caledonides. NGU. 360, pp. 159-193.
- Svensson, S-Å., 1982: Näsliden: a volcanogenic massive sulphide deposit in the Skellefte district, northern Sweden. SGU, Ser C, 790, pp. 1-81.
- Trepka-Block, C., 1982: Rakkejaur - a volcanogenic, proximal massive sulfide ore. GFF 104, p. 373.
- Trepka-Block, C., 1985: Cyclic ore formation of some volcanogenic massive sulfide deposits in the Skellefte district Sweden. Mineralium dep., 20, pp. 23-29.

Vivallo, W., 1985a: Early Proterozoic bimodal volcanism, hydrothermal activity and massive sulfide deposition in the Boliden-Långdal area, Skellefte district. Sweden, STU-report 81-3388.

Vivallo, W., 1985b: Geology and geochemistry of the ore-bearing volcanic sequence from the Kristineberg area in the Skellefte district, northern Sweden. STU-report 81-3387.

Wilson, M.R., Claesson, L-Å., Sehlstedt, S., Smelie, J.A.T., Aftalion, M., Hamilton, P.J., and Fallick, A.E. (In prep. 1986 Prec. Res.). Jörn: An early proterozoic intrusive complex in a volcanic-arc environment.

Wilson, M.R., Hamilton, P.J., Fallick, A.E., Aftalion, M., and Michard, A., 1985: Granites and early Proterozoic crustal evolution in Sweden: evidence from Sm-Nd, U-Pb and O isotope systematics. Earth Planet. Sci. Lett., 72, pp. 376-88.

Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977: Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology 20, pp. 325-347.

Ödman, O.H., 1939: The gold-copper-arsenic ore at Holmtjärn, Skellefte District, N. Sweden. GFF Bd 61.

Ödman, O.H., 1941: Geology and ores of the Boliden deposits, Sweden. SGU Ser C No 438.

Tabell 1 (1) Sulfidförekomster inom projektområdet.

Namn	Malmtyp	Huvudmineral	Värdbergart	Omvandlings- zoner	Storlek och halter
Borup	Kvartsbreccia	Arsenikkis	Massiv kvarts- keratofyr	Okänt	Obetydliga
Skäggträsk- berget	Kvartsgångar	Arsenikkis Svavelkis Zinkblände Blyglans Kopparkis	Fragmentförande kvartskeratofyr och peliska sedi- ment	Sulfidim- pregnation	Dm till meter breda gångar med ojämn sulfidhalt
Lappmössan	Impregnation och sliror	Svavelkis Magnetkis Zinkblände Blyglans Kopparkis Arsenikkis	Kvarts-fältspat porfyrisk kvarts- keratofyr †spilit	Sericit Klorit Biotit	Flera små an- samlingar
Ö. Högkulla	Kompakt delvis bandad	Svavelkis Zinkblände Magnetkis Blyglans	Kvarts-fältspat- porfyrisk kvarts- keratofyr	Sericit	0.1 M ton 0.2% Cu, 12.6% Zn 0.7% Pb, 28% S, 110 ppm Ag, 0.6 ppm Au
Önusberget	Kvartsgångar	Svavelkis Zinkblände Blyglans Kopparkis	Fragmentförande kvartskeratofyr	Sulfidim- pregnation	Dm till meter- breda gångar med ojämn sulfidhalt
Västra Maurliden	1. Kompakt 2. Impregnation	Svavelkis Zinkblände Kopparkis Blyglans Sulfömineral	Fragmentförande kvartskeratofyr	Sericit Klorit Kvarts	1. 5.7 M ton 0.2% Cu, 2.7% Zn 0.3% Pb, 36% S, 44 ppm Ag, 0.7 ppm Au

Tabell 1. forts.

Namn	Malmtyp	Huvudmineral	Värdbergart	Omvandlings- zoner	Storlek och halter
					2. ~2.6 M ton 1.0% Zn, 7.3% S, 0.2 ppm Au, 7.6 ppm Ag
Mellersta Maurliden	Impregnation och sliror	Svavelkis Kopparkis	Fragmentförande kvartskeratofyr	Klorit Sericit Kvarts	Flera små ansam- lingar
Östra Maurliden	1. Kompakt 2. Impregnation	Svavelkis Kopparkis Zinkblände Arsenikkis	Kvarts-fältspat- porfyrisk kvarts keratofyr	Klorit Sericit Kvarts	1. 1.2 M ton 0.8% Cu, 0.5% Zn, 33% S, 0.8 ppm Au, 16 ppm Ag. 2. Flera små an- samlingar
Norra Maurliden	Impregnation och kompakt	Svavelkis Kopparkis Arsenikkis Zinkblände	Kvarts-fältspat- porfyrisk kvartskeratofyr	Klorit Sericit Kvarts	~ 0.9 M ton 0.1% Cu, 1.1% Zn, 0.2% Pb, 11% S, 0.7 ppm Au, 27 ppm Ag.
Södra Norrliden	Impregnation och kompakt	Svavelkis Magnetkis Zinkblände Blyglans Sulfomineral	Kvartskeratofyr breccia	Sericit Kvarts	Flera små Au-rika ansamlingar

Tabell 1. forts.

Namn	Malmtyp	Huvudmineral	Värdbergart	Omvandlings- zoner	Storlek och halter
Norra Norrliden	Kompakt och impregnation	Svavelkis Kopparkis Zinkblände Blyglans Sulfomineral Magnetkis Arsenikkis	Kvartsporfyrisk kvartskeratofyr och spilit	Sericit Klorit	3.0 M ton 0.8% Cu, 2.5% Zn, 0.3% Pb, 21% S, 0.4 ppm Au, 43 ppm Ag.

Tab. 2 (1)		Na-anrikade		K-Mg anrikade	
		Ryolit	kvartskeratofyrer	kvartskeratofyrer	
		(7 prover)	(19 prover)	(27 prover)	
		$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$	F_{A-U}
SiO ₂	(vt%)	75.26 (5)	73.75 (6)	75.59	139
TiO ₂		0.29	0.34	0.21	100
Al ₂ O ₃		12.13	13.04	11.88	135
Fe ₂ O ₃ *		3.32	3.91	5.15	214
MnO		0.08	0.08	0.06	104
MgO		1.00	1.06	2.58	356
CaO		2.08	1.78	0.89	59
Na ₂ O		2.99	4.29	0.96	44
K ₂ O		2.29	1.40	2.68	162
P ₂ O ₅		0.06	0.06	0.04	92
CO ₂		0.97 (2)	-	0.15 (5)	21
H ₂ O ⁺		1.34 (2)	-	1.74 (5)	179
H ₂ O ⁻		0.12 (2)	-	0.10 (5)	115
A.I.		38	30	78	
Ba (ppm)		468	404	494	146
Cr		4 (4)	3 (13)	3	104
Cu		11 (4)	17 (13)	47	590
Zn		48 (4)	94 (13)	420	1208
Y		21 (4)	26 (13)	19	125
Li		9 (4)	11 (13)	14	215
Ni		2 (4)	2 (13)	2	138
Pb		16 (4)	17 (13)	87	751
Rb		61 (4)	33 (13)	61	138
Sc		10 (4)	11 (13)	14	193
Sr		71	89	34	66
V		20 (4)	20 (13)	30	207
Co		3 (4)	4 (13)	5	230
Zr		191	157	150	108

Tabell 2. Medelvärde av "friska" respektive mera omvandlade vulkaniter samt anriknings-urlakningsfaktorn (F_{A-U}).

Tab 2 (2)

	Ryolit (3 prover)	Na-anrikade Kvartskeratofyrer (7 prover)		K-Mg-anrikade Kvartskeratofyrer (16 prover)	
	$\bar{X}$	$\bar{X}$	F_{A-U}	$\bar{X}$	F_{A-U}
La	18.80	14.67	67	17.24	127
Ce	43.60	37.53	73	41.26	131
Nd	20.43	18.83	79	19.97	135
Sm	5.15	5.08	84	5.28	142
Eu	0.89	1.14	109	1.12	174
Gd	5.09	5.05	85	5.23	142
Dy	5.86	5.80	84	6.07	143
Er	3.60	3.00	71	3.08	146
Yb	4.16	3.82	78	4.39	146
Lu	0.66	0.58	75	0.69	144
REE _{TOT}	108.25	95.94	76	105.04	134
La _N /Yb _N	2.98				

Tab. 2 (3)

	Basalt	Na-anrikad spilit	
	(4 prover)	(10 prover)	
	$\bar{X}$	$\bar{X}$	F_{A-U}
SiO_2 (vt%)	50.23 (3)	56.68 (8)	83
TiO_2	0.74	1.01	100
Al_2O_3	17.47	15.00	63
$Fe_2O_3^*$	9.70	10.30	78
MnO	0.14	0.17	89
MgO	4.49	3.74	61
CaO	9.43	5.18	40
Na_2O	2.35	4.18	130
K_2O	0.61	0.61	73
P_2O_5	0.16	0.21	96
CO_2	2.32 (2)	0.27 (3)	9
H_2O^+	1.75 (2)	2.04 (3)	85
H_2O^-	0.15 (2)	0.11 (3)	54
A.I.	30	32	
Ba (ppm)	114	197	127
Cr	60 (2)	85	104
Cu	78	51	48
Zn	82	83 (5)	74
Y	15	22 (5)	107
Li	7 (1)	9 (5)	94
Ni	13 (3)	36 (9)	202
Pb	10 (3)	12 (5)	88
Rb	12 (3)	14 (5)	85
Sc	44 (1)	39 (5)	65
Sr	210 (3)	183	64
V	349 (2)	228 (6)	48
Co	22 (1)	21 (5)	70
Zr	54	102	138

Tab 2 (4)

	Basalt	Na-anrikad spilit	
	(3 prover)	(6 prover)	
	$\bar{X}$	$\bar{X}$	F_{A-U}
La	5.86	7.07	88
Ce	18.01	22.58	92
Nd	8.43	10.98	95
Sm	2.37	3.11	96
Eu	0.81	0.93	84
Gd	2.52	3.35	97
Dy	2.62	3.72	104
Er	1.59	2.26	104
Yb	1.56	2.32	109
Lu	0.25	0.37	108
REE _{TOT}	44.02	57.45	96
La _N /Yb _N			

Tab 2 (5) Hög Mg-låg Ti basalter (basaltiska komatiiter)
(8 prover).

	$\bar{X}$		$\bar{X}$
SiO ₂ (wt%)	49.13	La	9.58
TiO ₂	0.64	Ce	27.15
Al ₂ O ₃	12.29	Nd	14.47
Fe ₂ O ₃ *	9.54	Sm	3.23
MnO	0.19	Eu	0.94
MgO	13.54	Gd	2.82
CaO	10.52	Dy	2.14
Na ₂ O	1.79	Er	1.16
K ₂ O	0.99	Yb	1.08
P ₂ O ₅	0.48	Lu	0.17
		REE _{TOT}	62.74
		La _N /Yb _N	5.83
Ba (ppm)	299		
Co	794		
Cu	75		
Zn	104		
Y	13		
Ni	227		
V	213		
Zr	65		

FIG. 1

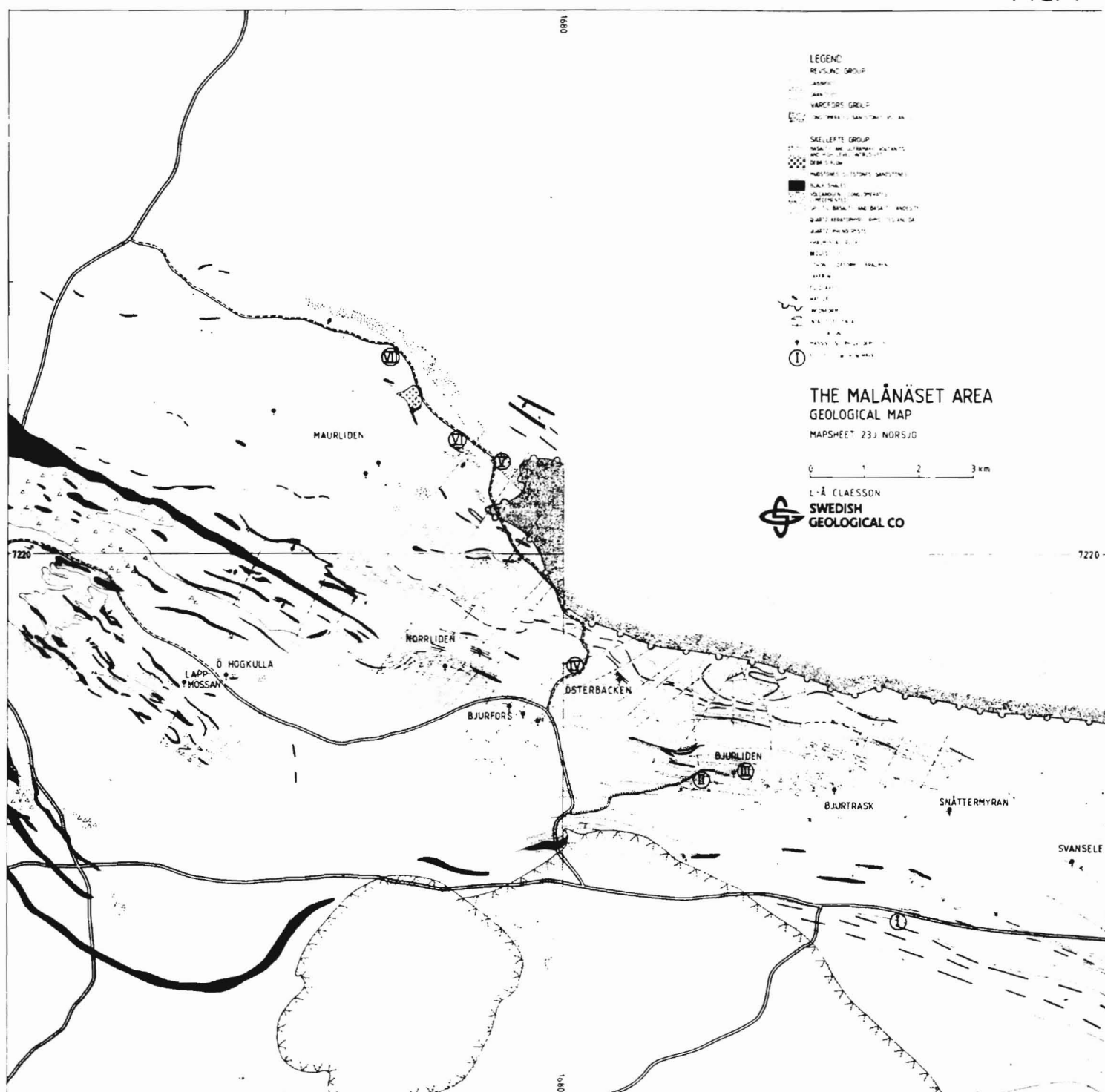
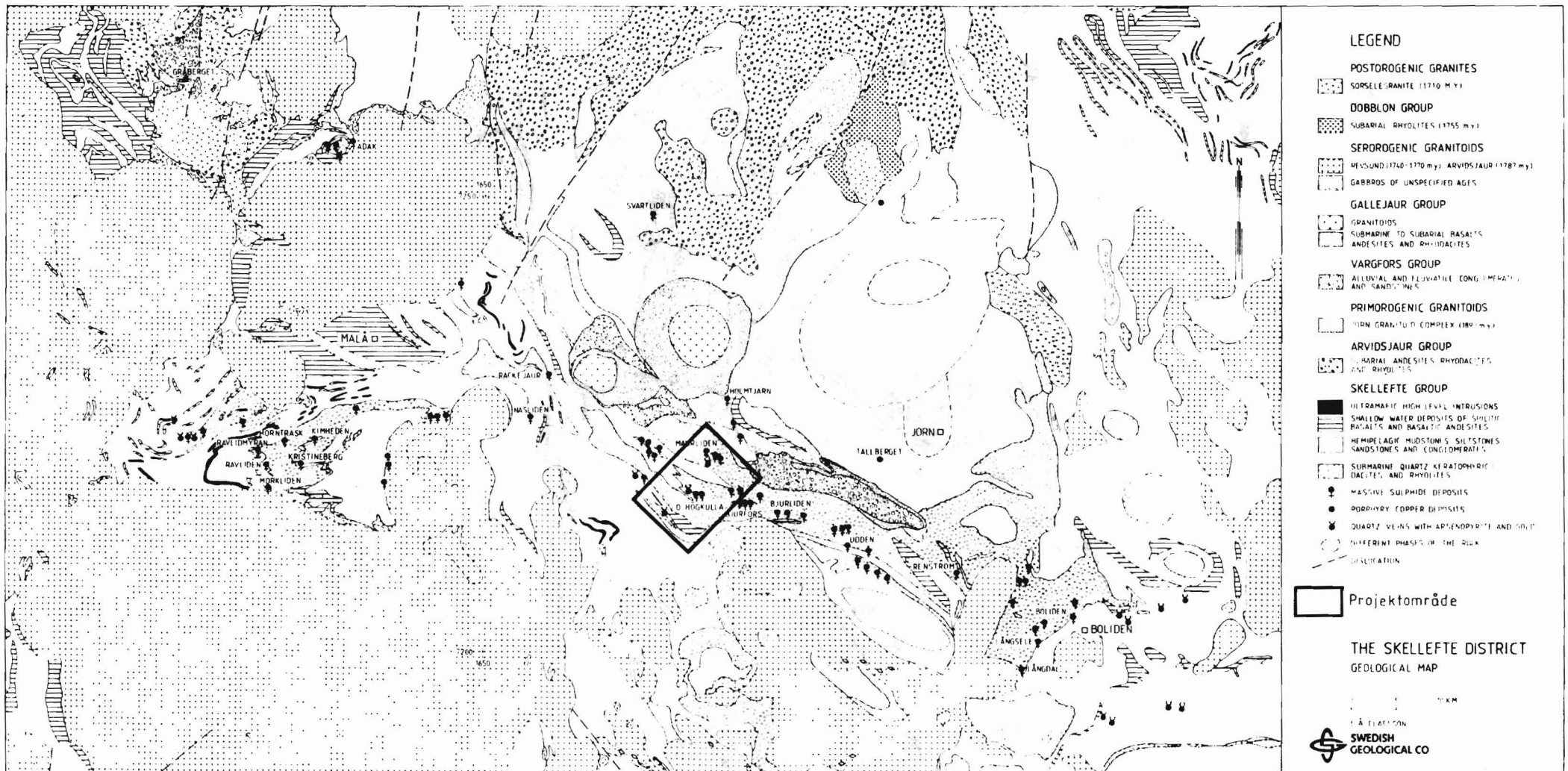


FIG. 2



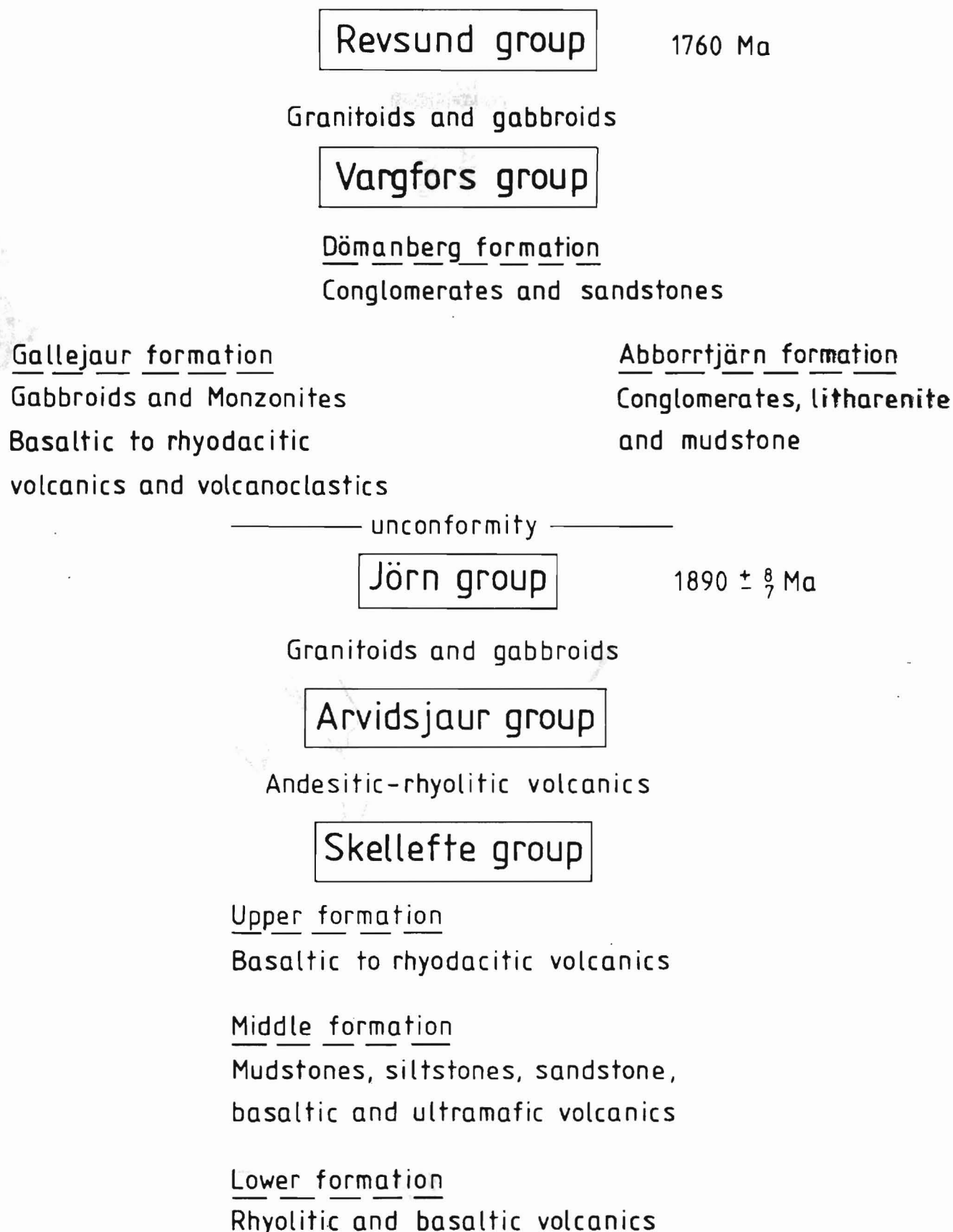


Fig. 3 Stratigraphic scheme of the central part of the Skellefte district.

FIG. 4

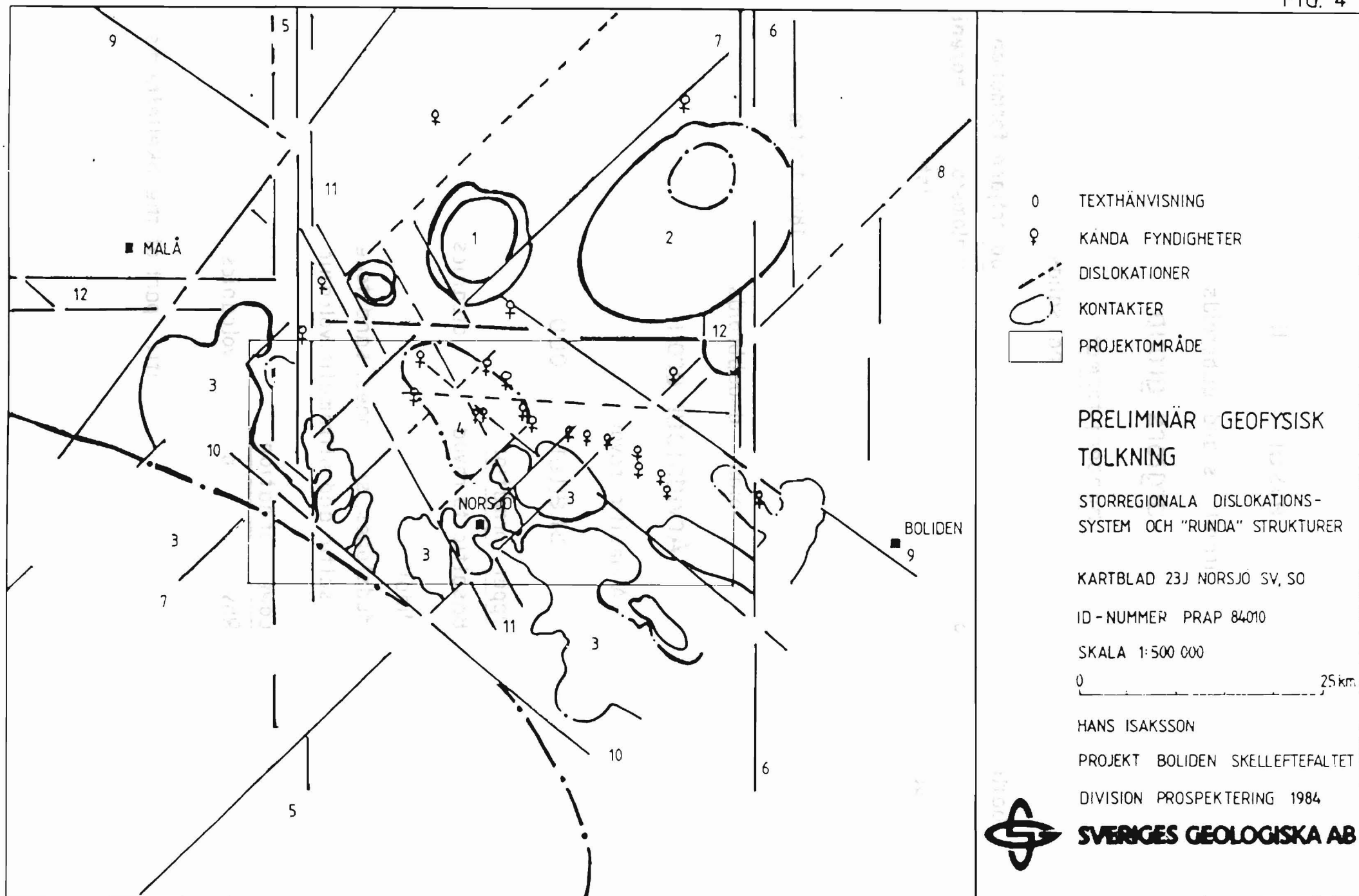
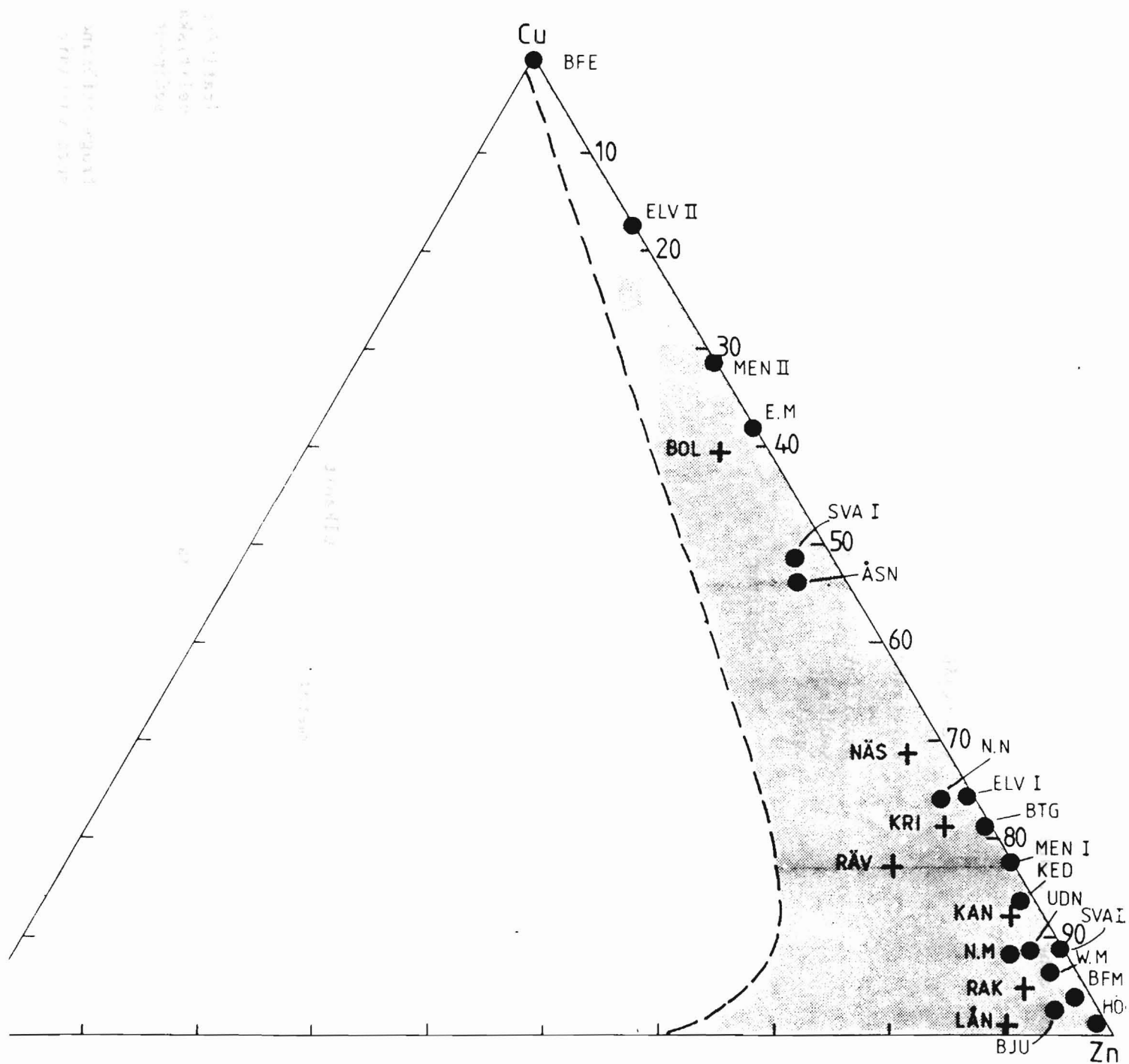


Fig. 5. Litologiska enheter i delområdenas stratigrafier

<u>Borup</u>		<u>Skäggträskberget</u>		<u>Önusbäcken</u>
Pelitiska sediment + grafit	Basiska tuffer och lavar	Kvartsgångar med sulfider		Kvartsgångar med sulfider
Tuffiter (basiska och sura)		Pelitiska och psamitiska sediment + grafit	Intrusiv grönsten	Psamitiska, pelitiska och vulkanoklastiska sediment
Kalksten + sur vulkanit		Tuffiter		Kvarts-fältspat-porfyriska vulkaniter
Kvartsbreccierad massiv sur vulkanit (proximalt)	Basiska agglomerat och tuffer	Fragmentförande (proximalt) bandade (distalt) sura vulkaniter	Basiska tuffer	
Fragmentförande och bandade sura vulkaniter (distalt)			Sulfid fyndigheter	
<u>Maurliden</u>		<u>Vargforsdammen</u>		<u>Norrliden-Bjurfors</u>
Kvarts-fältspat porfyrisk vulkanit		Alluviala konglomerat, lithareniter och lerstenar	Stratavulkaniter Basalter-ryoliter	Fluviala konglomerat och sandstenar
Basiska gångar samt agglomerat				
Pelitiska sediment		Regression		
Bandade (distalt) fragmentförande (proximalt) sura vulkaniter	Sulfid fyndigheter	Turbiditiska gråvackor med "debris flows"	Basaltiska komatiiter	Grafitförande pelitiska sediment
		Kvarts-fältspatporfyrisk vulkaniter		Bandade och fragmentförande sura vulkaniter
				Sulfid fyndigheter

FIG. 6



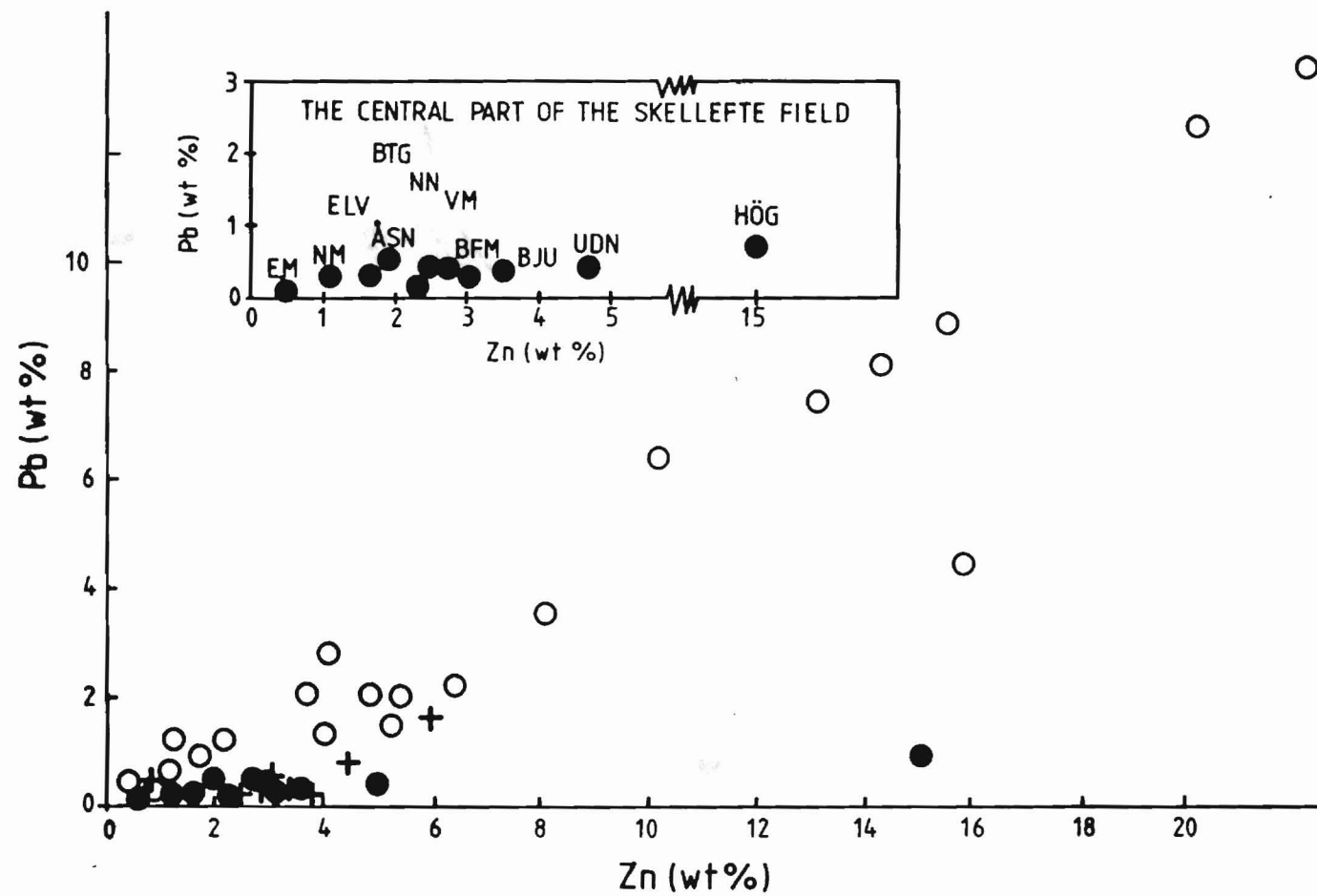


FIG. 7

FIG. 8

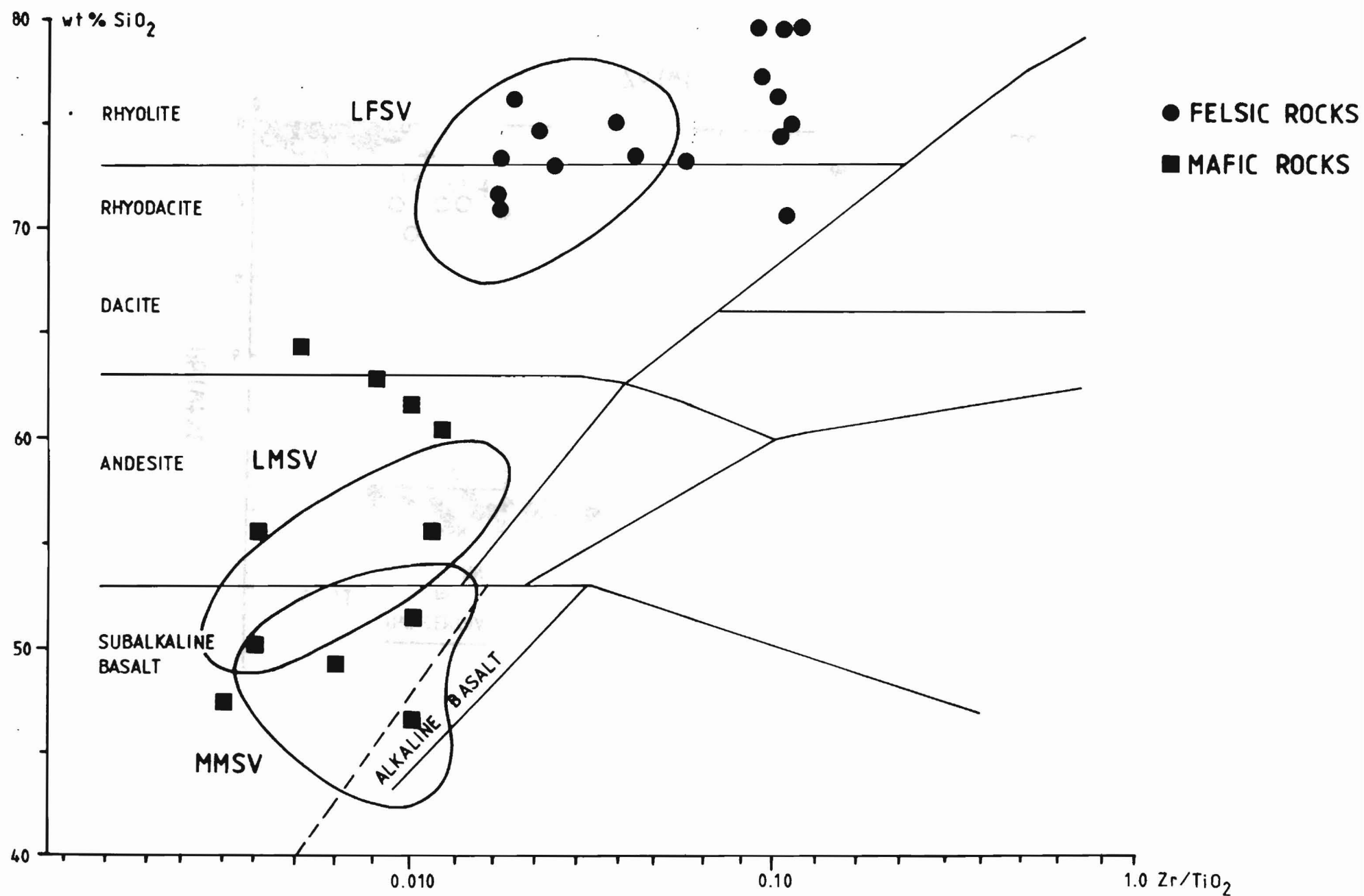


FIG. 9

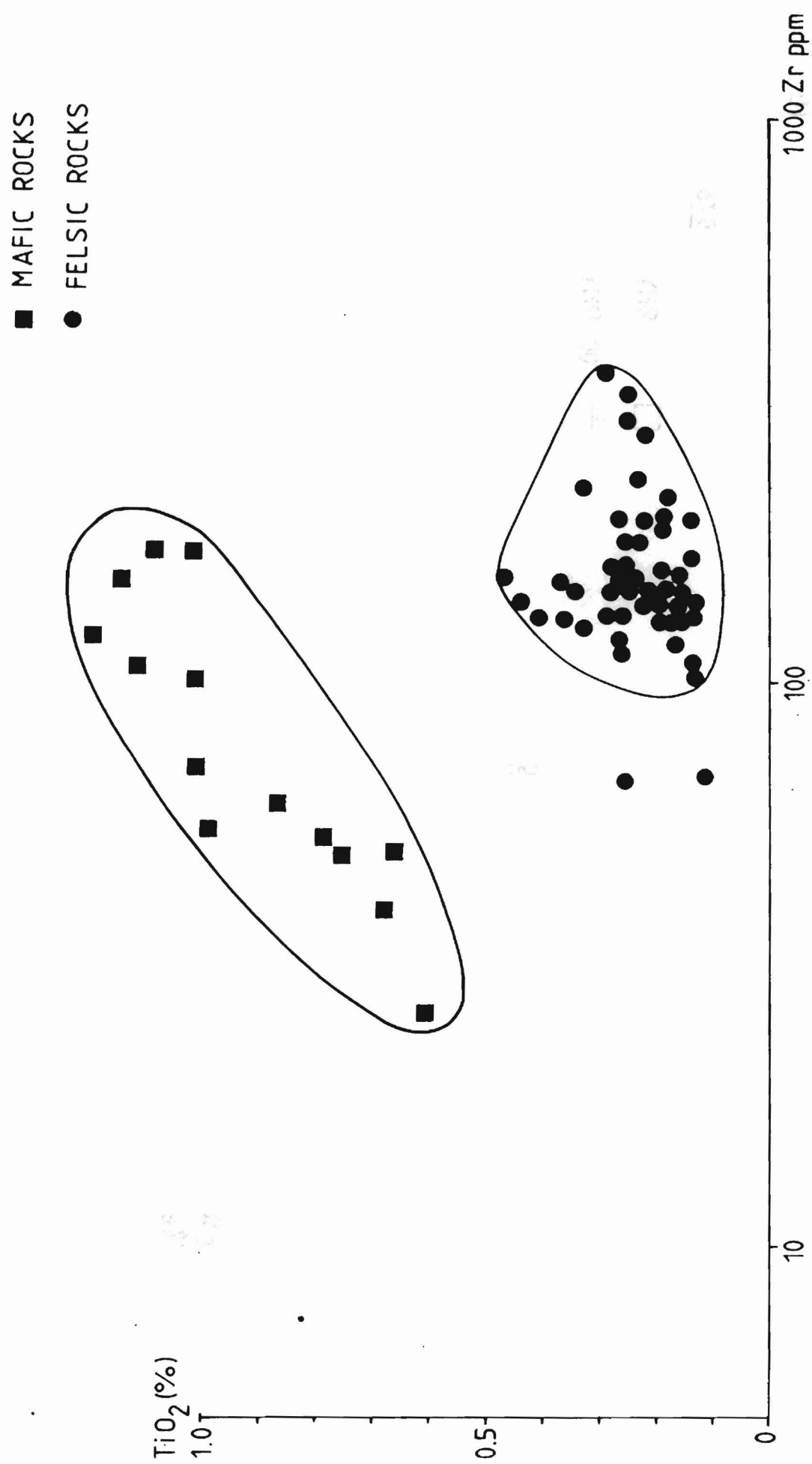


FIG. 10a

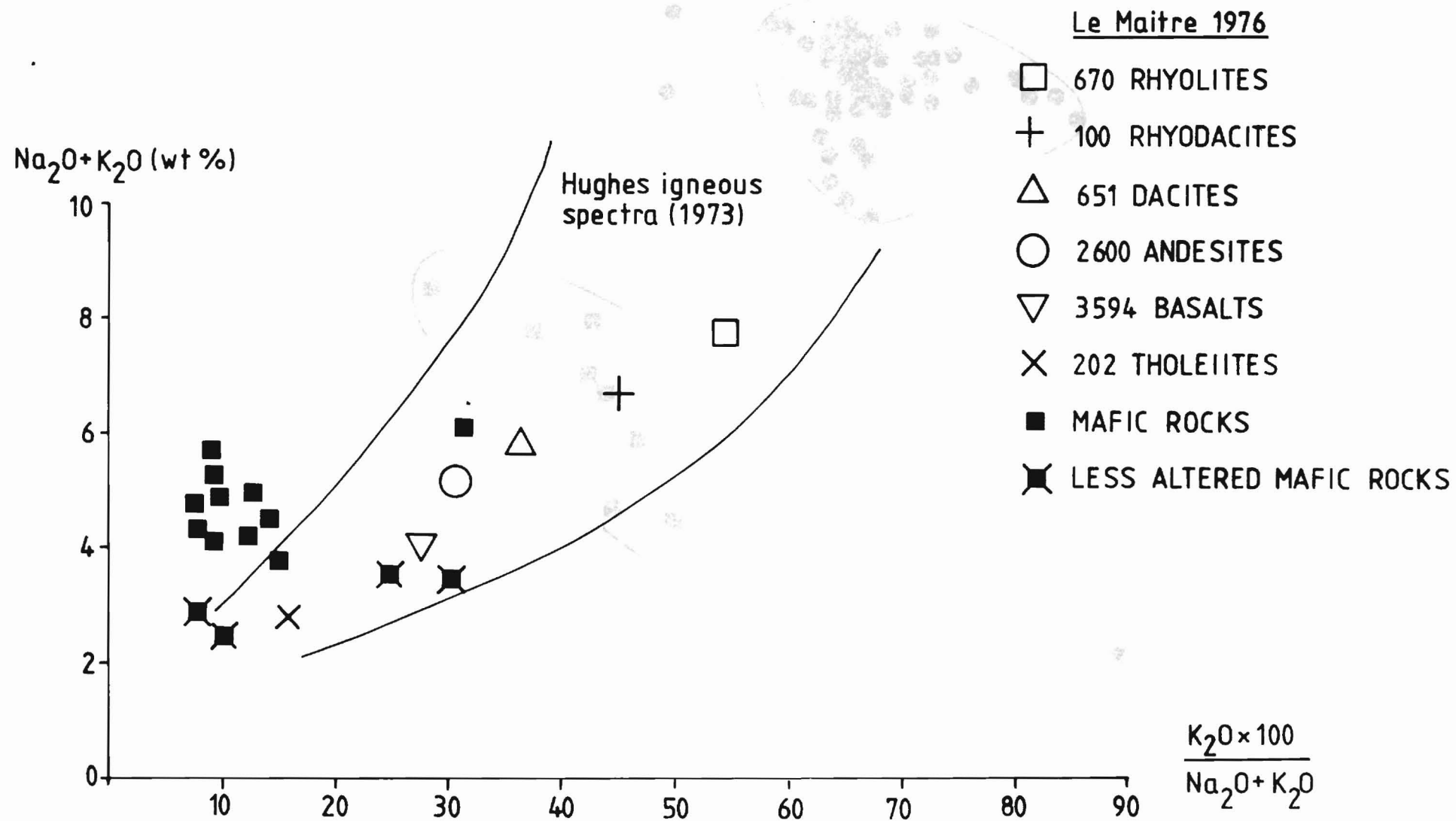
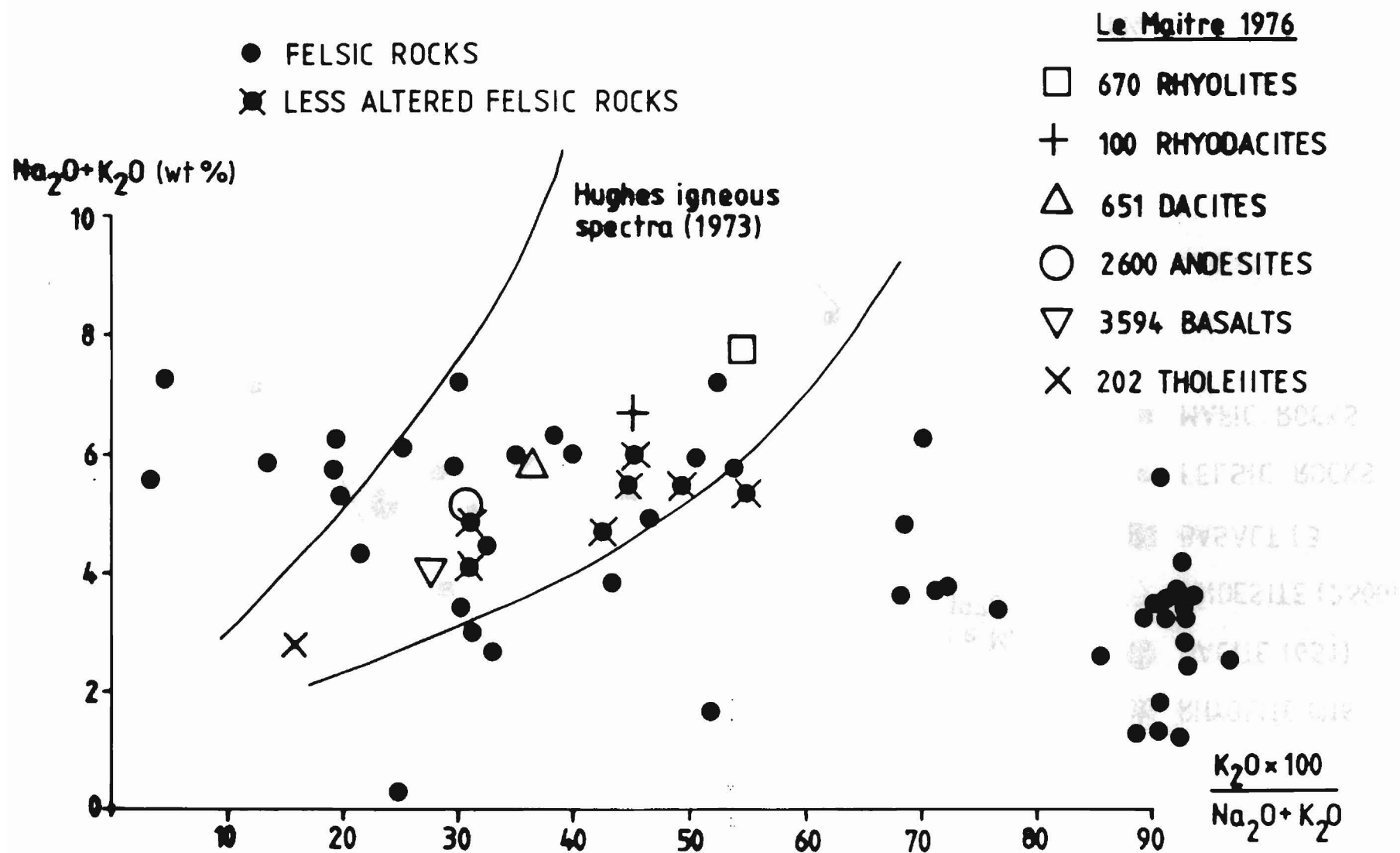
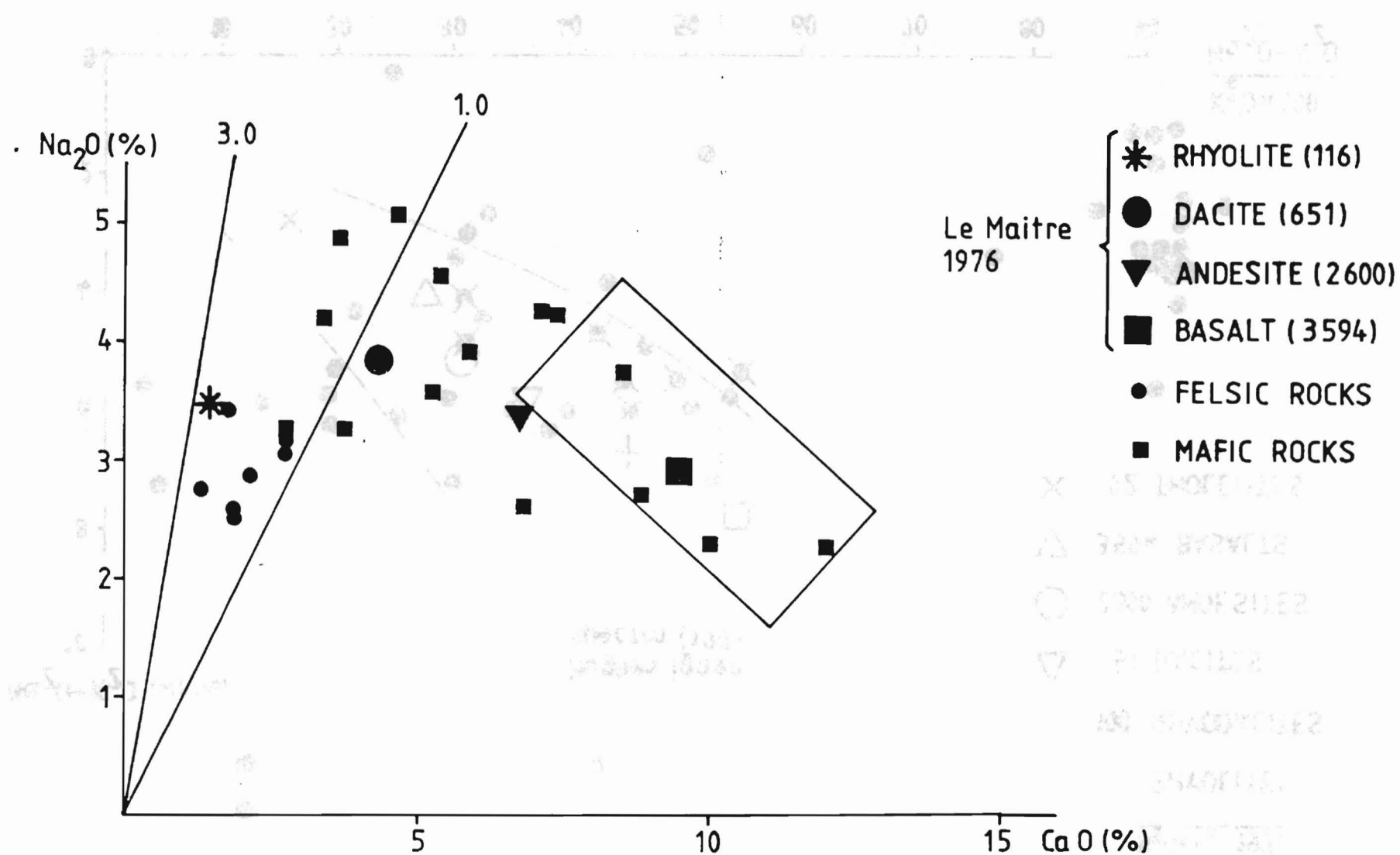


FIG. 10b





MAFIC ROCKS

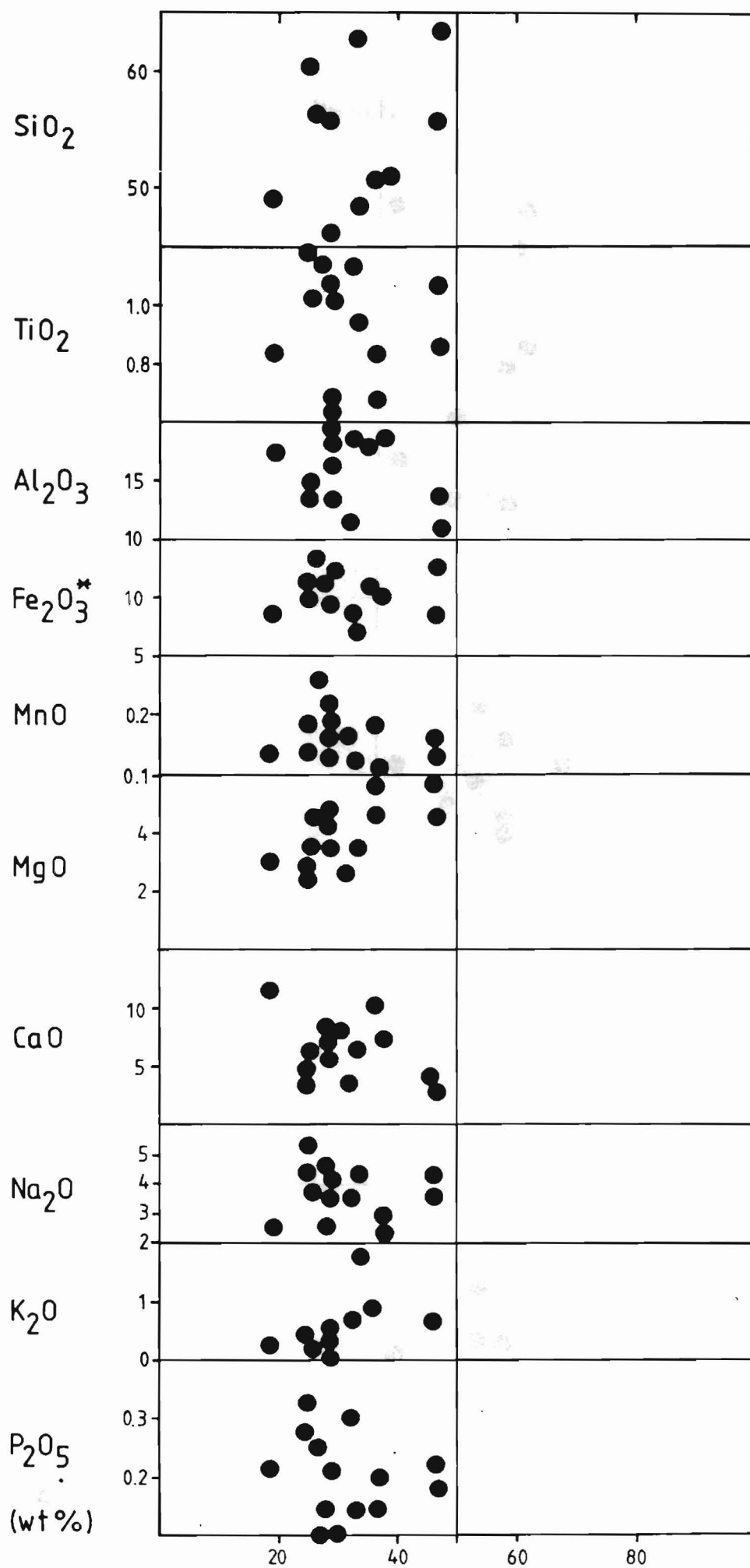


FIG. 12b

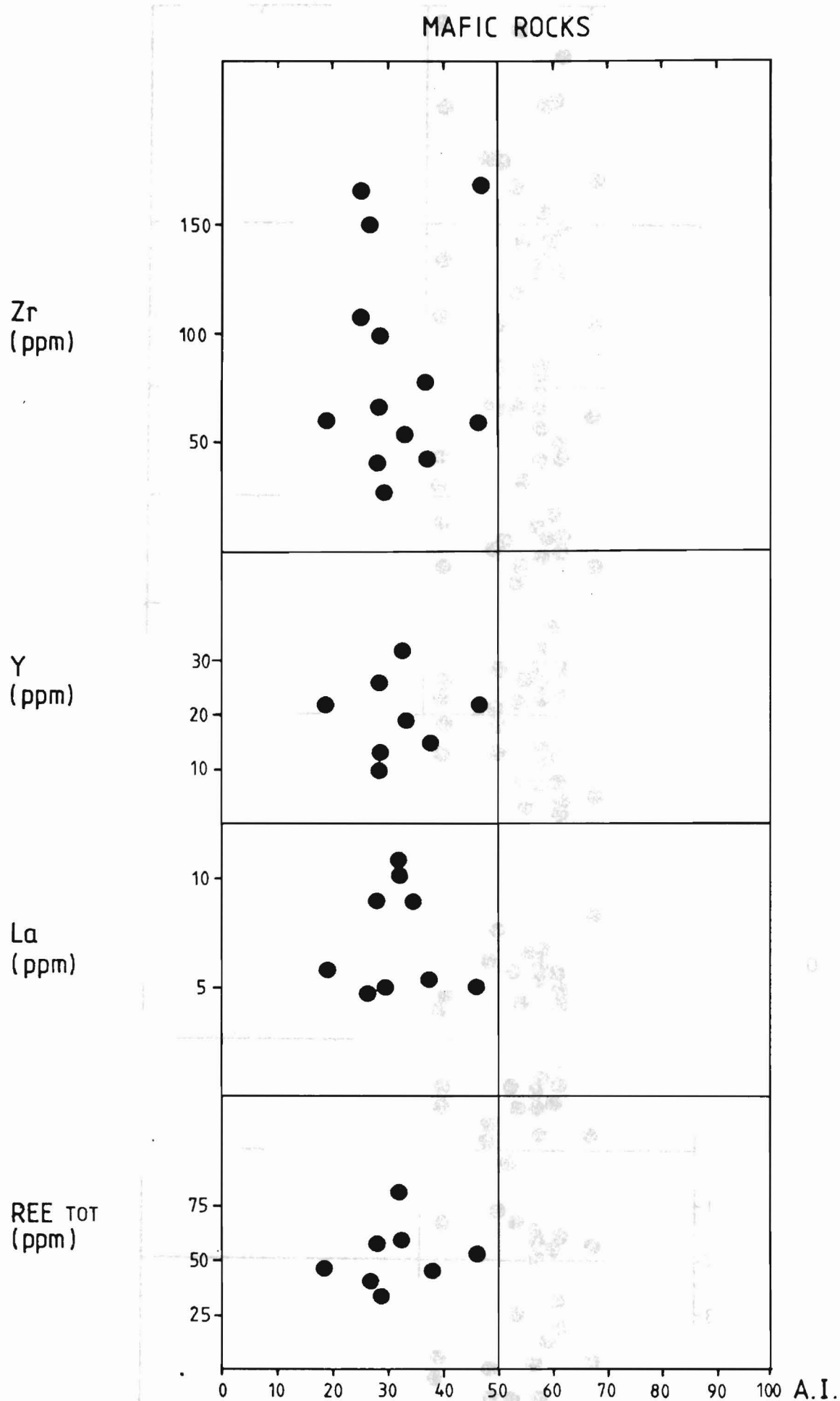


FIG. 13a

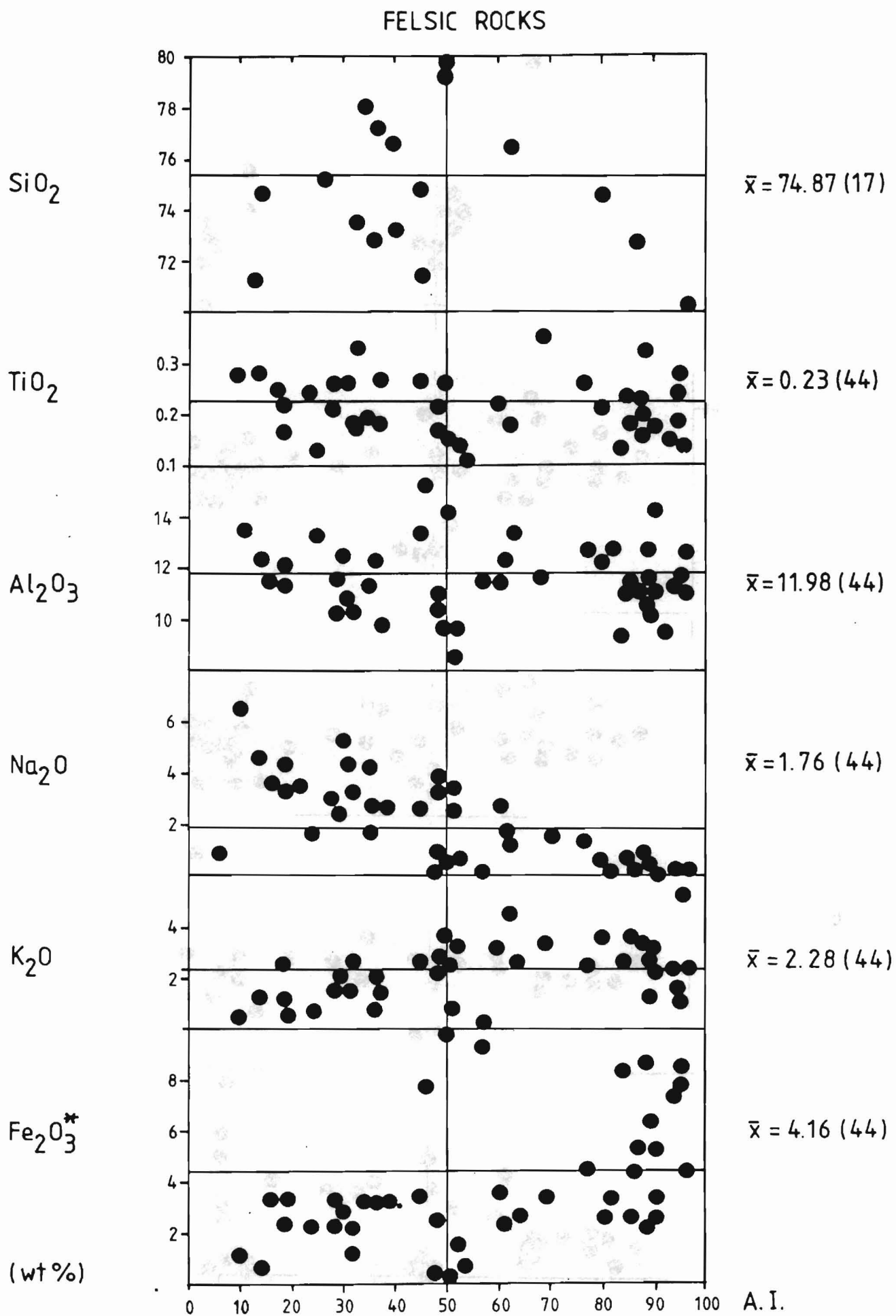


FIG. 13b

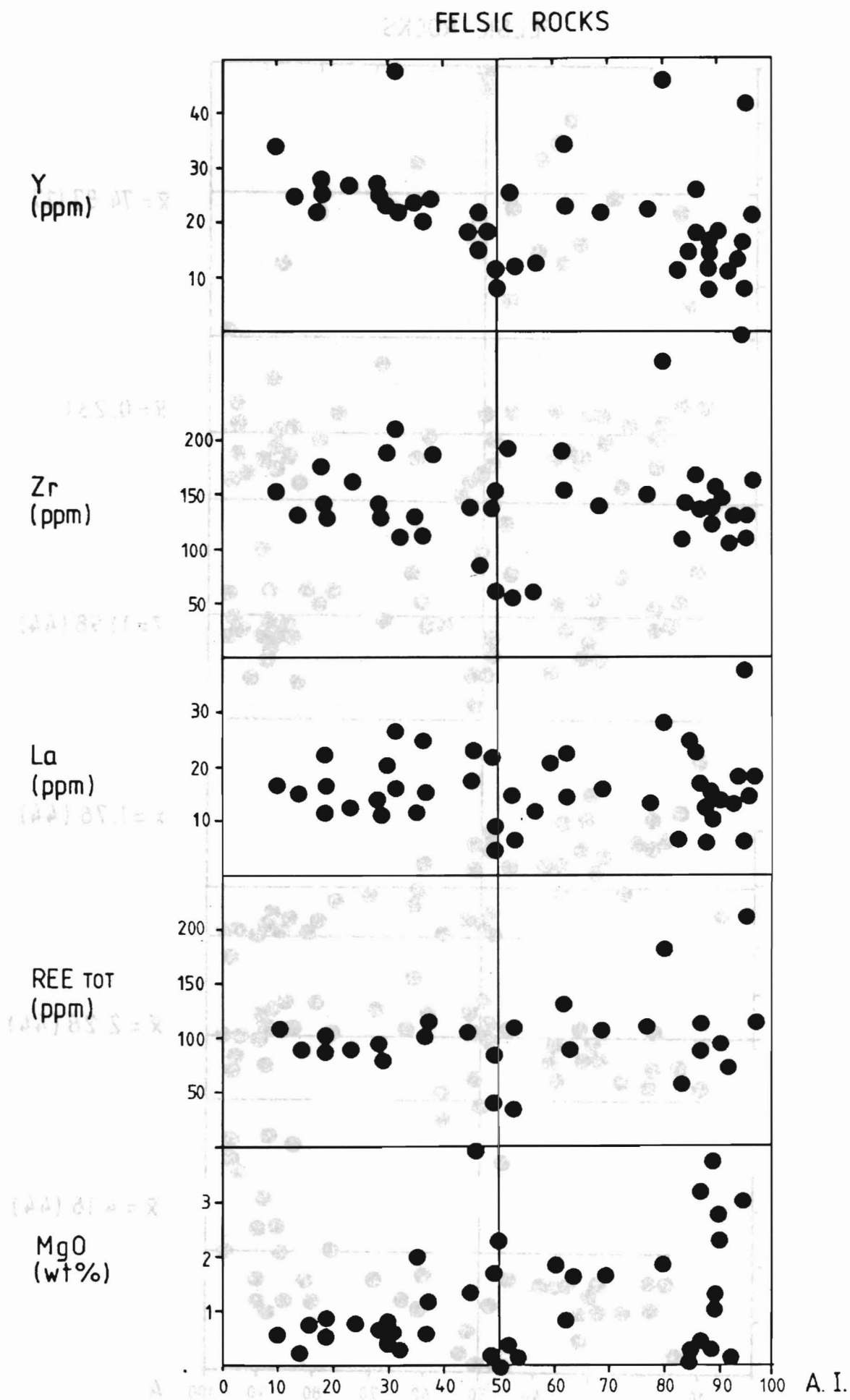


FIG. 14

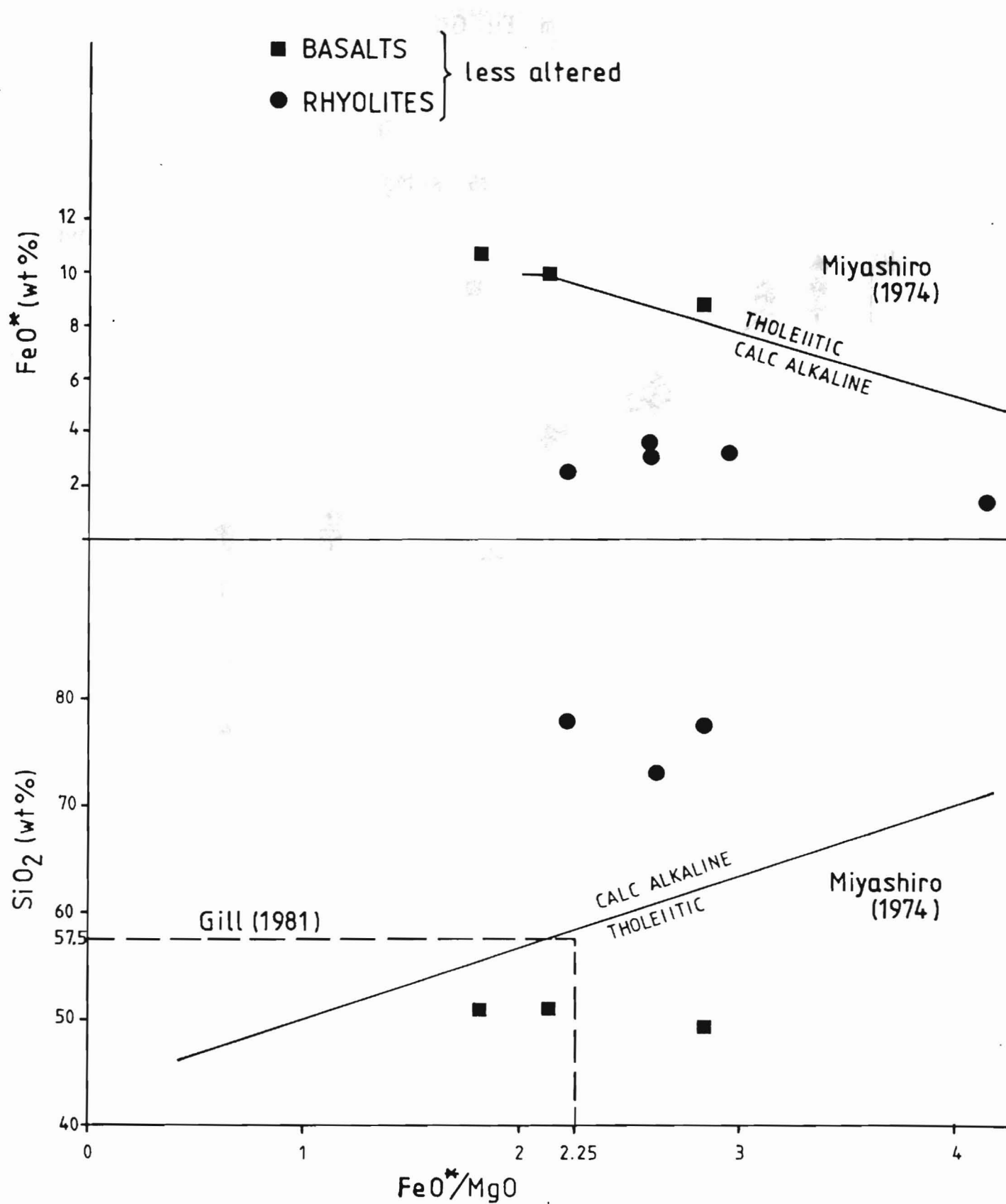


FIG. 15

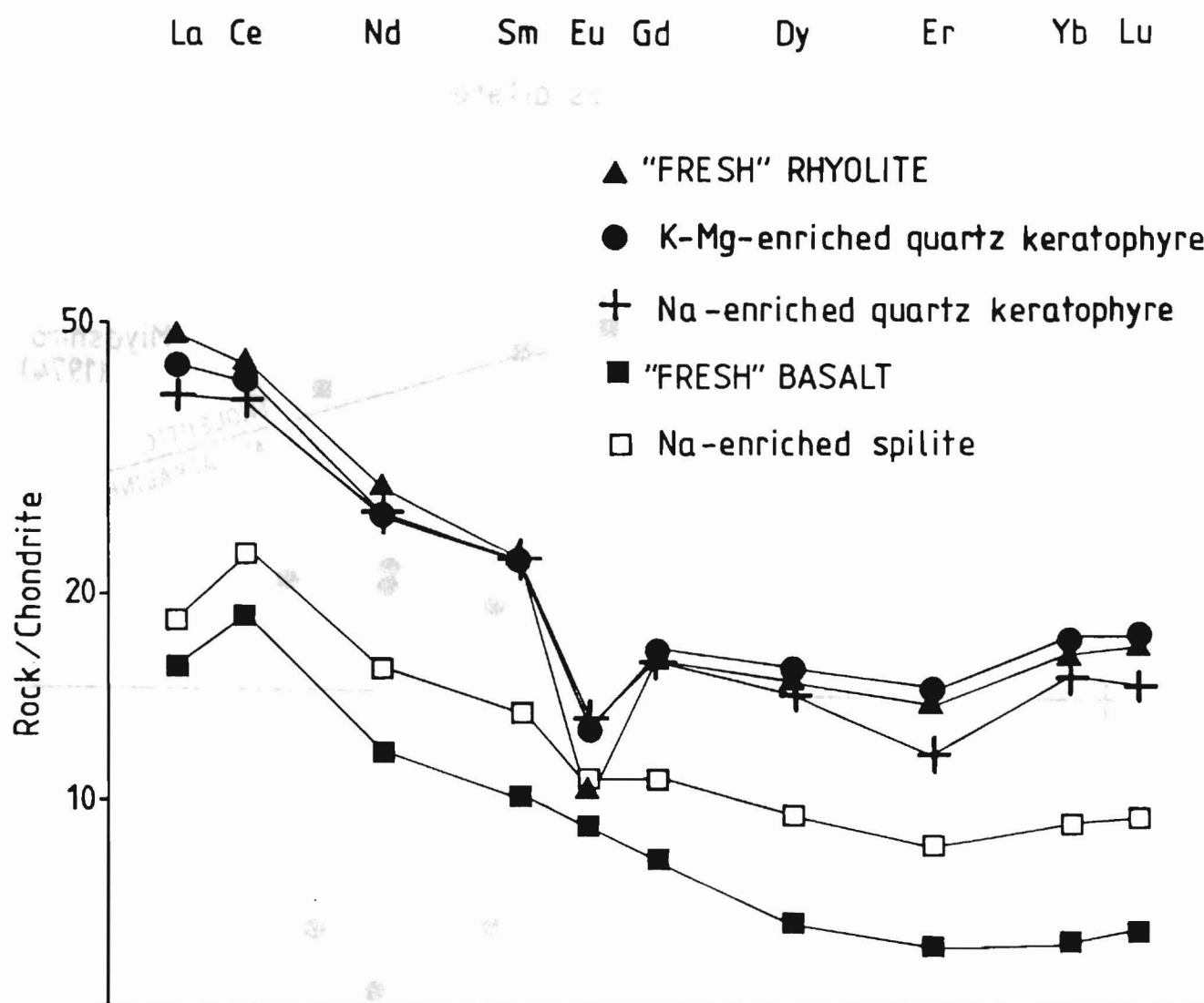


FIG. 16a

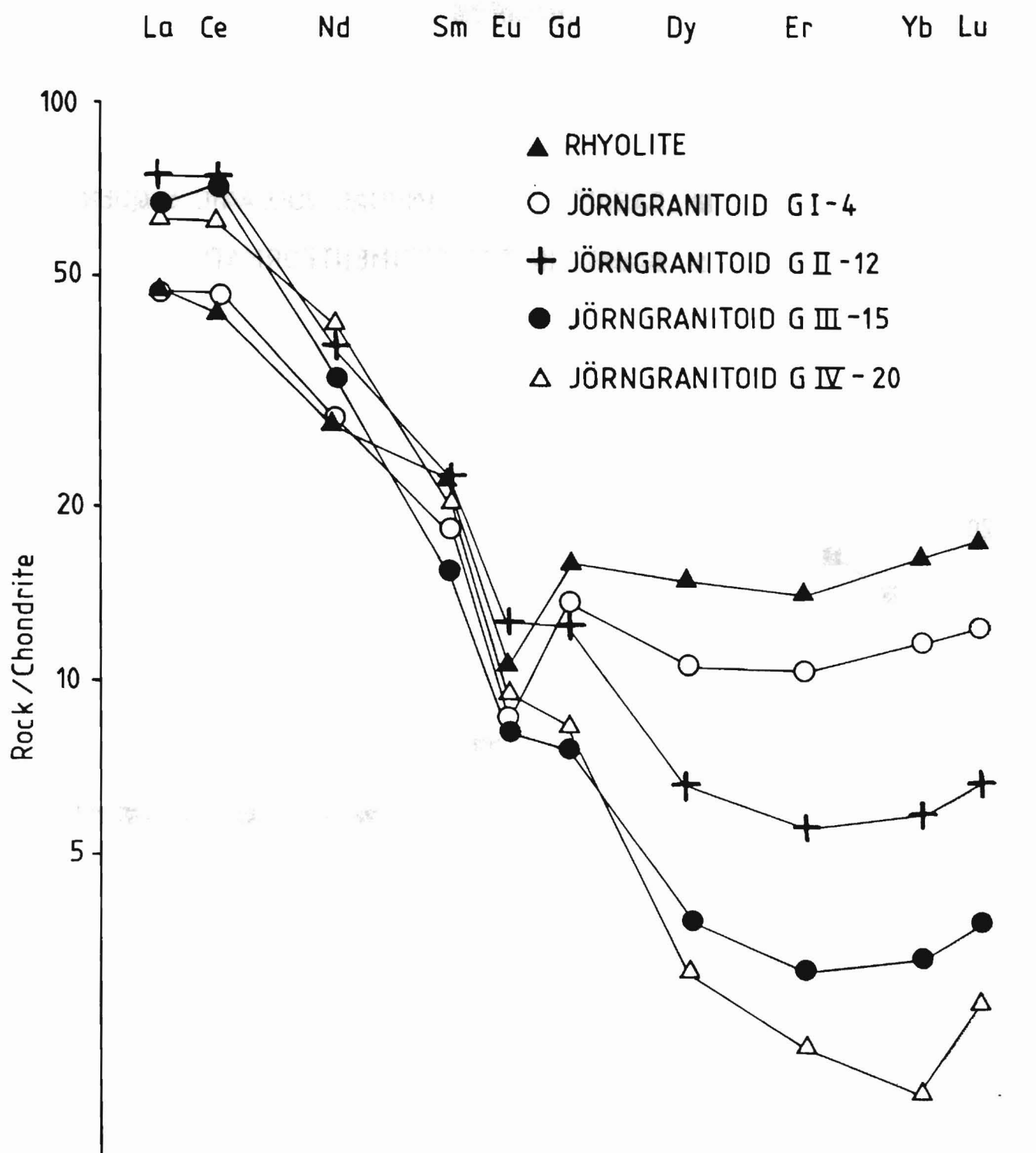
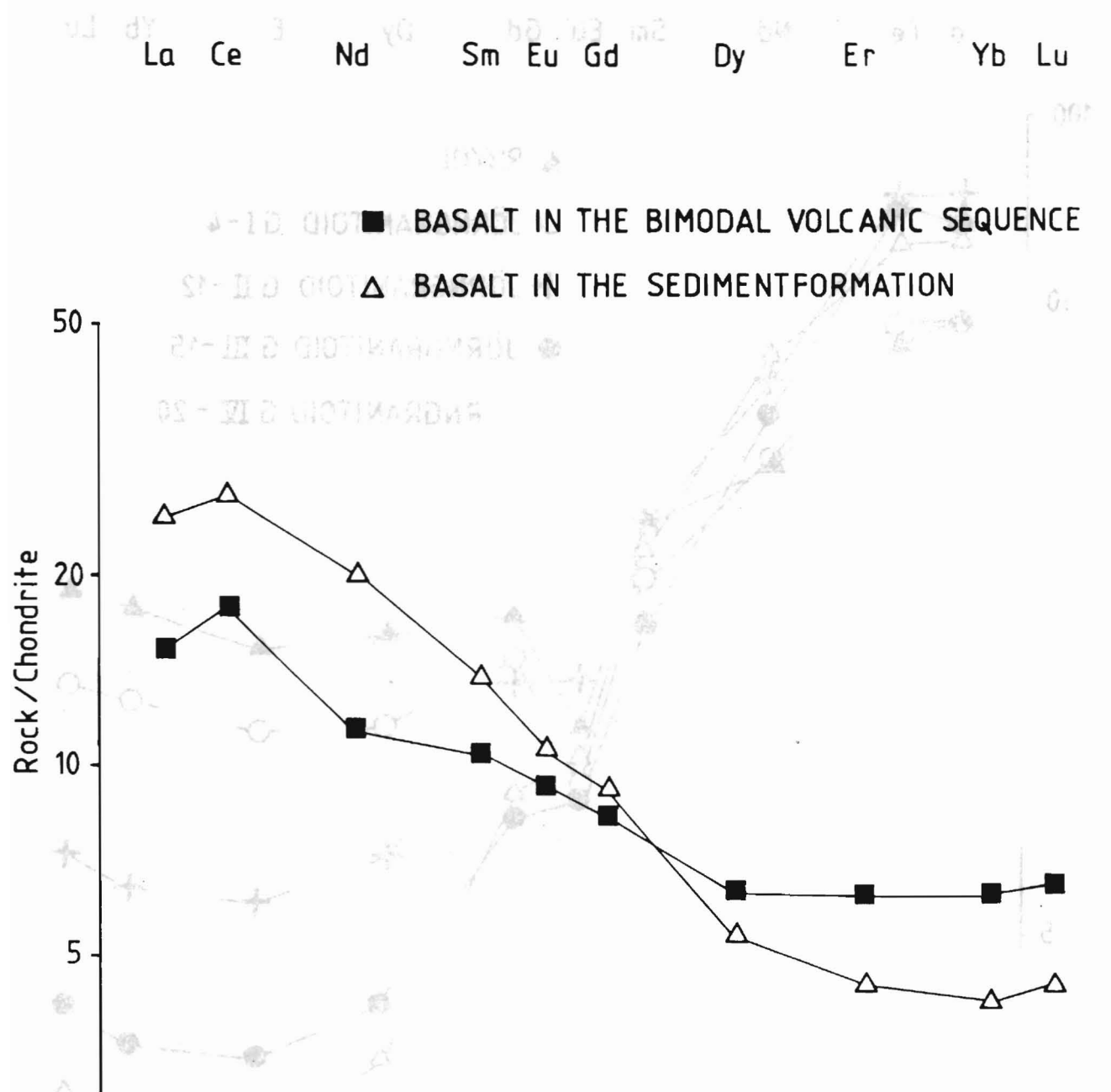
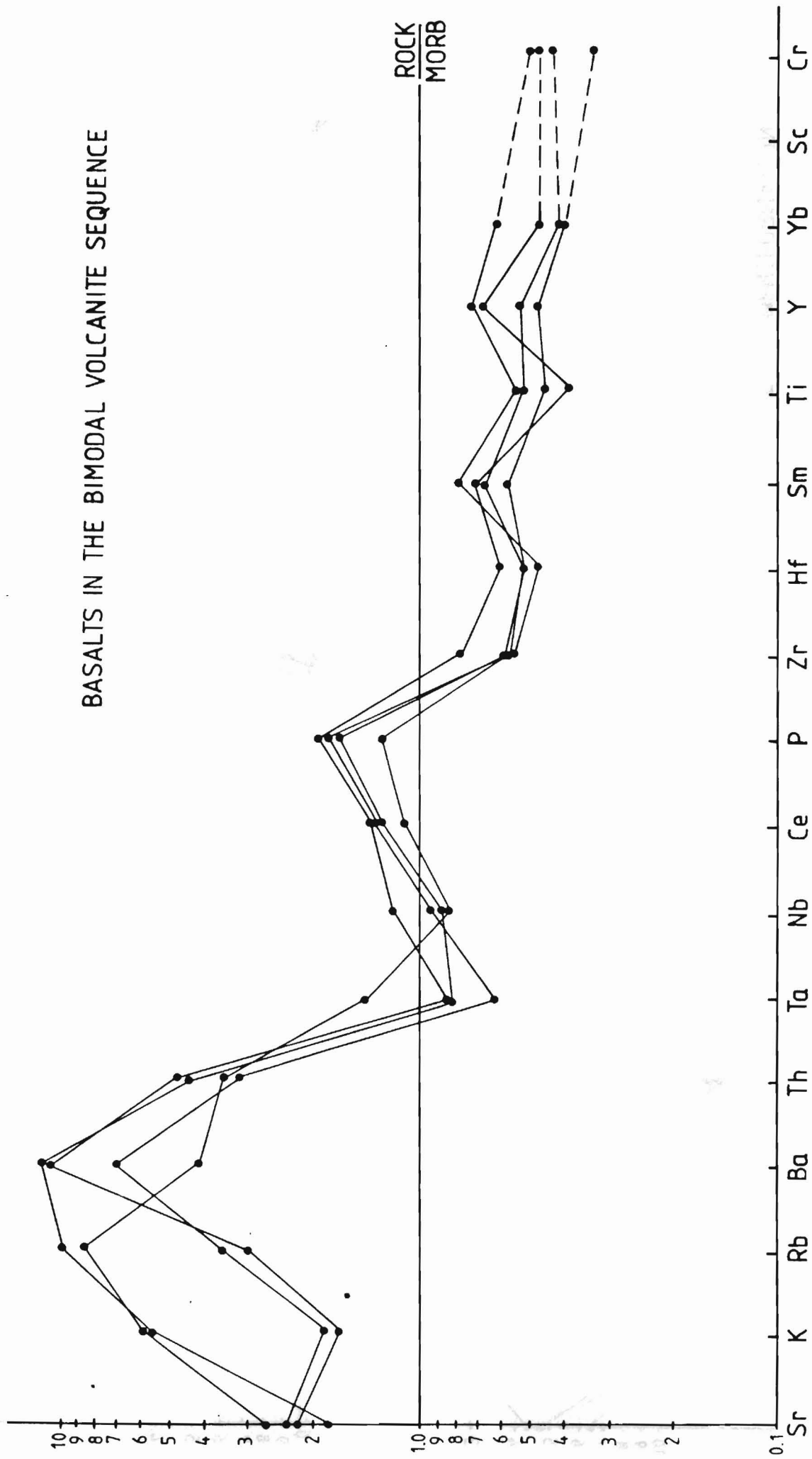


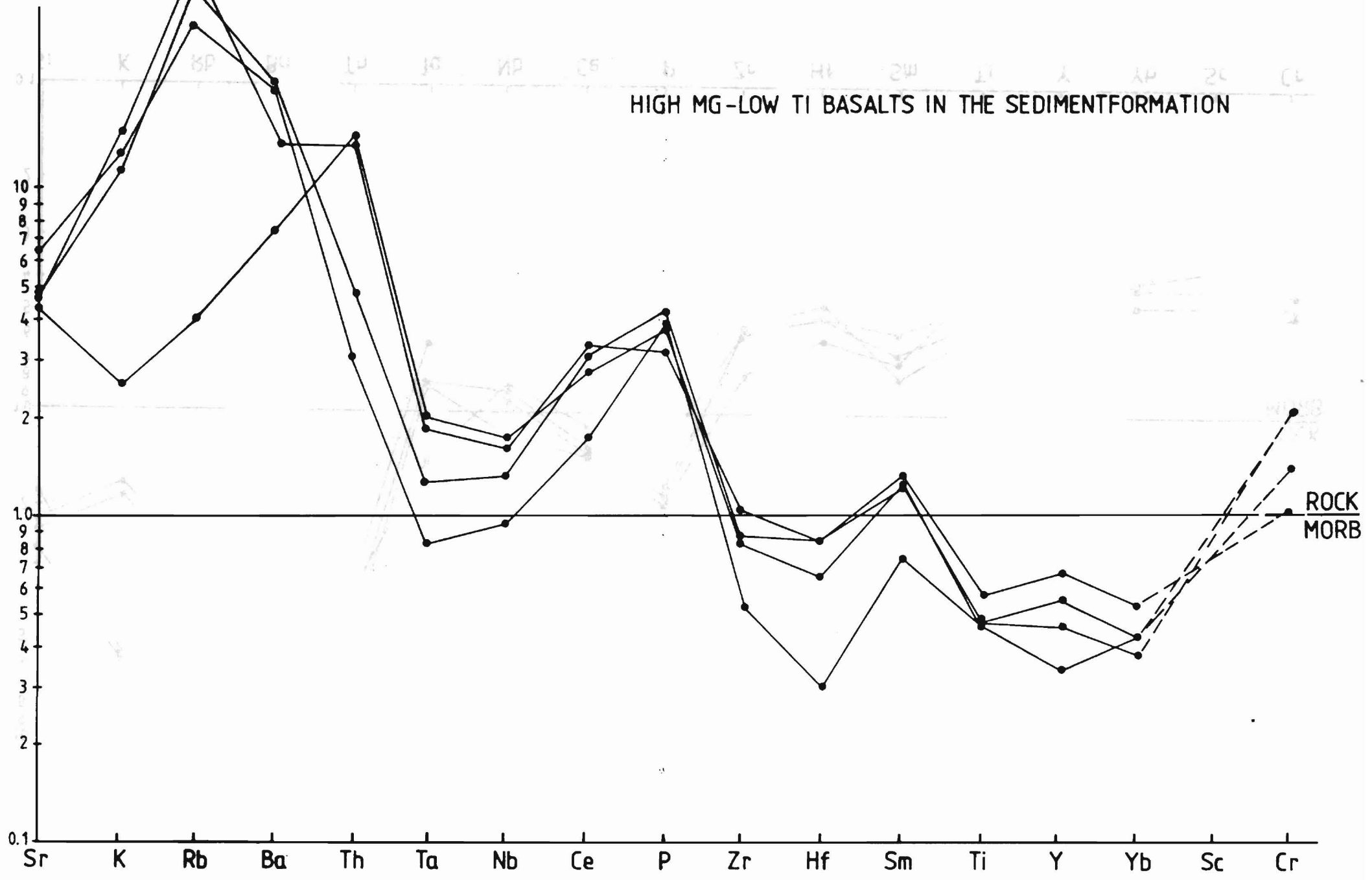
FIG. 16 b



BASALTS IN THE BIMODAL VOLCANITE SEQUENCE



HIGH MG-LOW TI BASALTS IN THE SEDIMENTFORMATION



SVERIGES GEOLOGISKA AB
SGAB INTEX
Lennart Lindqvist
Lars-Åke Claesson

STU : 84-4465
SGAB : PRAP 85548
Datum : 86-01-31

OMVANDLINGAR OCH DESS KEMI

SIMCA-analys av bergarter
från Malånäsfältet

Förundersökning

1. INLEDNING

Inom STU-projektet, Vulkanisk stratigrafi i centrala Skellefteåfältet (STU: 84-4465), har en begränsad studie utförts i syfte att med multivariat dataanalys studera omvandlingar och dess kemi i bergartsprover.

Målsättningen har varit att utvärdera möjligheterna till att använda multivariat dataanalys baserad på SIMCA-programmet för att karaktärisera omvandlingar och hur kemiska variabler, huvud och spårelement, är korrelerade till dessa i syfte att underlätta identifieringen och lokaliseringen av sulfidmalmsbildningar.

För undersökningen har använts 56 prov från Malånsfältet i västerbottens län. Proven representerar både basiska och felsiska bergarter.

Genom mikroskopiering av slipprov har följande egenskaper identifierats i nästa alla proven, frisk (FR), karbonatomvandling (KA), kloritomvandling (KL), sulfider (SU), sericitomvandling (SE), amfibol (AM) och biotit (BI). Beteckning inom parentes återfinns som variabelidentifiering i SIMCA-plottarna. Omvandlingarna har kodats som ett värde mellan 0-3, där 0=frisk, 1=svagt omvandlad, 2=omvandlad, 3=starkt omvandlad.

Proven (56 st) har analyserats kemiskt av SGAB-ANALYS med ICP på följande element,

Al,Ca,Fe,K,Mg,Mn,Na,P,Ti,Ag,Ba,Be,Cd,Co,Cr,Cu,La,Li,Mo,
Ni,Pb,Rb,Sb,Sn,Th,Zn,Zr,V,W,Y.

Dessutom har 36 prov analyserats av CNRC, Frankrike på

La(=LA),Nd, Eu,Dy,Yb,Ce,Sm,Gd,Er,Lu.

Eftersom La har analyserats av två laboratorier så används i denna rapport La för SGAB ANALYS och LA för den franska varianten.

Undersökningen av bergartsproverna har resulterat i en tabell med data för 56 prov som delvis är analyserade på maximalt 47 variabler. Tabellen består av 2304 mätvärden samt med 328 mätningar som ej har utförts (missing values).

I denna rapport har endast ett begränsat antal resultat presenterats för att ge en ide om vad en bearbetning med multivariat dataanalys kan bidra med, för att öka förståelsen av omvandlingar och dess kemi. Ett speciellt kapitel behandlar även hur man tolkar resultaten från en SIMCA-analys.

2. MULTIVARIAT DATAANALYS

Det enklaste sättet att analysera resultaten i en tabell med data är att manuellt studera en kolumn, variabel, i taget. Ju större tabellen är desto svårare blir det att effektivt extrahera den information som finns tillgänglig i tabellen. Nästa steg i den traditionella dataanalysen kan vara att plotta två variabler mot varandra i en vanlig XY-plot. För att kunna plotta fler än 2 variabler samtidigt måste man använda sig av andra metoder.

En av de vanligaste multivariata dataanalysmetoderna är principal komponent analys (Principal Component Analysis, PCA eller PC) som introducerades inom geologin redan i slutet av 60-talet tillsammans med datorernas intåg.

En geometrisk beskrivning av PCA är att man projicera provpunkterna i variabelrymden mot en speciell riktningsvektor som kallas principal komponent samtidigt som man ställer vissa kriterier på projiceringen. Metoden projicera proven mot komponenter, som oftast inte sammanfaller med ursprungsvariablernas riktning utan den riktning som är optimerad, med avseende att beskriva så stor del av variationen som möjligt.

Figur 1 visar en 3-dimensionell rymd där varje punkt är representerad av 3 variabler. Med PC-analys kan man nu beräkna den mest dominerande riktningen (PC1) eller så många komponenter man anser sig behöva för att lösa problemet. Dessa riktningar, principal komponenter, kan beräknas lika många som man har ingående variabler och metoden ger även att dessa riktningsvektorer är inbördes vinkelräta, dvs oberoende.

Principalkomponenterna har den egenskapen att de beskriver riktningarna med avtagande förklarad mängd variation. Således visar den första komponenten den riktning som har

den maximala variationen som dock inte behöver vara den informationsriktning vi är mest intresserad av och som löser vårt problem. Den andra komponenten visar den riktning som har den näst största variationen och är vinkelrät mot den första, den tredje är vinkelrät mot både första och andra komponenten osv..

Genom att projicera prov och variabler mot en PC-komponent eller olika plan dvs par av komponenter, underlättas tolkningen avsevärt av en datatabell. För att skapa dessa projektioner (bilder) kan vi tvingas till att ta bort vissa extremvärden som styr i vilken riktning PC-axlarna kommer att läggas och därmed styr planets lutning och riktning i för hög grad. Dessa outliers eller grupper av outliers kan också representera olika typer och grupper av prov som bör uteslutas från analysen, av de problem man försöker lösa.

PC analys möjliggör att man kan projicera objekten och ursprungsvariablerna mot samma plan. Variabel plotten (Fig 2) används för tolkning av datastrukturen i tabellen och vilka variabler som orsakar att vissa objekt hamnar i ett speciellt läge på objektplotten (Fig 3).

Variabel projektionen (Fig 2) visar variablernas läge i ett plan som beskriver 41.4 procent av den totala variationen i datatabellen. Projektionen mot den första komponenten beskriver 27.6 procent av variationen och komponent 2 med 13.8 procent. Vi kan alltså genom att reducera antalet variabler till två nya variabler PC1 och PC2, beskriva nästan hälften av variationen i de 47 variablerna.

Det normala sättet att rita dessa plan är att den horisontella axeln beskriver den komponent som har den större variationen av de två ingående komponenterna som spänner upp det plan vi vill studera. Den andra komponenten blir den vertikala riktningen och där centrum (nollnivån) längs PC-axlarna markeras med ++. Den positiva sidan på komponenterna räknas till höger och uppåt från centrum.

Från centrumvärdet går en vektor till varje variabel som är markerad för några variabler i figur 2. I den mångdimensionella rummet (47 dimensioner = antal variabler) har i detta fall varje variabel skalerats så att den har en enhetlig längd. De är då enkelt att förstå att ju närmare centrum variablerna ligger desto större del av variabeln är riktad i en annan dimension utifrån planet och därmed sprider variabeln överna mindre i den aktuella projektionen i planet. Det är sedan upp till dig som geolog, geokemist, geofysiker etc att välja hur nära centrum du skall gå för att beskriva en komponent. Var noga med att skilja på tolkningen av en komponent eller ett plan. När du tolkar exempelvis den första komponenten skall du projicera ner alla variabler mot den horisontella axeln och för den andra komponenten mot den vertikala axeln.

Ytterligare egenskaper som man tolkar ur variabelplotten är att ju närmare två variabler ligger varandra desto större likhet har de med varandra. Numeriskt så gäller att korrelation mellan två variabler i planet är lika med $\cos$ för vinkeln mellan dem räknat från centrum.

I figur 2, ligger La och LA nära varandra och dessa vektorer är relativt långa och därmed är variablerna väl beskrivna i detta plan. Tolkningen av enbart dessa variabler skulle kunna vara att för bergartsprover av denna typ så överensstämmer analysresultaten bra mellan de två laboratorierna och analysmetoderna.

Projektionen är även symmetrisk, dvs att man kan flytta variabelns läge på samma avstånd på motsatt sida av centrum (++) och därmed erhålla variabelns komplement. I figur 2 kan vi således flytta SE på andra sidan centrum och därmed lägga till ytterligare tolkning i bilden.

Det är dessa egenskaper i variabelprojektion, variabelns längd från centrum, variabelkorrelationen och ansamlingen

av variabler, som används för tolkning av resultaten tillsammans med objektprojektionen i motsvarande plan.

Objektplotten (Fig 3) visar varje provs läge projicerat på samma sätt som variablerna mot samma plan. Varje prov har fått en tvåställig identitet för att lättare kunna skriva ett stort antal prov i samma bild. Även här gäller att den komponent som visar den större variationen är den horisontella axeln och att centrum markeras med ++.

Med hjälp av figur 2 kan vi nu tolka tex att provet OM har en förhöjning av Co,V,Ca,Ni,Mn,Ti,P,Cr,Mg beroende på att provets läge överensstämmer med dessa variablers läge i förhållande till centrum. Det är även viktigt att komma ihåg att tolkningen av bilderna sker med stöd från att det verkligen existerar en meningsfull korrelation mellan variablerna och att provens läge i objektplotten beror på korrelationsstrukturen mellan alla variabler i provet, dvs hur provet ligger i den mångdimensionella rymden.

Efter att ha accepterat att PCA metoden endast lägger in ett nytt koordinatsystem genom punktmängden på ett speciellt sätt, så är det lätt att förstå vilken nytta och styrka metoden ger till tolkningen av en tabell. Det är ju inte självklart att det geologiska fenomenet man studerar ligger vinkelrät mot de variabler som vi mäter, utan ligger som ett punktmoln i en speciell riktning i variabelrymden (Fig 1). Det är klart att det är enklare att förstå data och att lösa ett problem om vi hade kunnat mäta en variabel längs samma riktning som PC1 än med de tre ursprungsvariablerna som inte är optimal för problemlösningen.

En annan styrka med PC-analys är att provets läge längs PC-axeln beror på alla variabler som man väljer skall ingå i analysen. Det är ju egentligen provets och variablernas läge i den mångdimensionella rymden som projiceras mot en principal axel eller plan. Detta innebär att tex provet OA

i figur 3 inte säkert har höga värden på alla variabler på den negativa sidan av första komponenten som är markerade i nedre vänstra hörnet (Fig 2). Provet kan tex vara lågt i Co men trots detta finns en dominerande egenskap bland de andra variablerna som motsvarar den multivariata signaturen för en basisk bergart. Detta innebär i sin tur att om vi bara hade studerat Co kolumnen med tex en univariat metod, tex histogram, så hade vi felaktigt klassificerat provet som en felsisk bergart.

Proverna Oe och Og (Fig 3) är förhöjda i W,Zn,Cd,Sb,Ag, Cu,Sn,Pb medan proverna Ol,Op,O6 är förhöjda på Nd,Sm,Gd, LA,Ce,Lu,Er,Dy,Zr,Yb. Det är även tydligt att några prov avviker starkt från de övriga proverna och att det finns två grupper av prover, basiska och felsiska.

För en mera ingående beskrivning av PC-analys med SIMCA-programmet se Wold et al (1983), Wold et al (1984), Wold (1985), samt några exempel inom prospektering, Esbensen & Wold (1983), Lindqvist & Lundholm (1985), Esbensen et al (1985).

3. OMVANDLINGAR OCH DESS KEMI

Rubriken lovar mer än vad den kan hålla i denna rapport. Det är dock möjligt att kunna uppfylla rubrikens målsättning med hjälp av SIMCA-metoden och en systematisk bearbetning av ett provmaterial.

Om vi återgår till figur 2 och tolkar denna så finner vi i nedre vänstra hörnet typiska variabler för basiska bergarter, Co,V,Ca,Ni,Mn,Ti,Cr,P,Mg. Till höger på den positiva sidan av första komponenten, finns en anhopning av lantanoidvariabler och denna sida tolkas som en felsisk miljö. Första komponenten som är den mest dominerande informationen i tabellen beskriver då en basisk/felsisk komponent och att provens spridning i horisontalled beror på dessa egenskaper.

Andra komponenten (den vertikala) tolkas som en mineraliseringsfaktor bestående av W,Zn,Sb,Ag,Pb,Sn,Cu, dock representerat av bara några få prov. Ytterligare en egenskap som framgår av figur 2 är att omvandlingsegenskaperna ligger relativt nära centrum (++), och det är därför svårt att kunna uttala sig något om omvandlingar och dess kemi med hjälp av den blandning av basiska och felsiska bergarter samt med några extremprover som är närvarande i datatabellen. För den fortsatta bearbetningen har därför extremvärden uteslutits och att proven har delats upp i två grupper, basiska och felsiska bergarter.

Nedan följer en tolkning av några omvandlingar och dess kemi för felsiska och basiska bergarter var för sig. Här spänner omvandlingsvariablerna bättre ut projektiionsplanet och därmed finns dessa egenskaper bättre representerade i planet än i figur 2.

Figur 4 beskriver två komponenter för de felsiska bergarterna. Till vänster på den första komponenten, ligger sericit (SE), karbonatomvandlingar (KA) och friska prov tillsammans med de kemiska variablerna Ca och Na. De friska proven har en aning mer Na, än SE och KA som har en större andel Ca.

De felsiska bergarterna har även en stark korrelation mellan biotit (BI), klorit (KL) och Zr,Ce,La,La,Y (Fig 4) och är väl separerade från de övriga variablerna. På motsatta sidan av andra komponenten, den vertikala, ligger P och tolkas som att BI och KL har ett underskott av denna variabel.

För de basiska proven så visar den horisontella axeln den första komponenten (Fig 5) att sulfid (SU) och kloritomvandlade (KL) prov har en ökning av lantanoiderna tillsammans med ytterligare några variabler. På den negativa sidan av första komponenten ligger sericitomvandling (SE) som inte är korrelerad med några speciella variabler men däremot antikorrelerad med lantanoiderna samt SU och KL.

Den tredje komponenten för de basiska bergarterna (vertikala axeln) ger att biotit (BI) är korrelerad med Li,K,Ba,Cu och att denna grupp av variabler är antikorrelerad med W,Th,Sn,Ag på den negativa sidan. Omvänt gäller att den negativa sidan visar en intressant mineraliseringsfaktor och att dessa element är antikorrelerad med biotit och dess associerade kemiska variabler.

Motsvarande objektplot för dessa variabelplottar skulle naturligtvis visa vilka prov som har den aktuella kemiska egenskapen men dessa plottar har utelämnats i denna rapport.

4. SAMMANFATTNING

Multivariat dataanalys underlättar analysen och ger snabbt information ur en datatabell med tex geologiska data. Med SIMCA programmet är det ej heller nödvändigt att alla prov analyseras på alla variabler. Beroende på styrkan i den multivariata bearbetningen är det även möjligt att prediktera halter för de variabler som saknas.

Multivariat dataanalys beskriver dels provens inbördes relation samtidigt som den beskriver vilka egenskaper och variabler som är typiska för olika grupper av prover. Multivariat dataanalys ökar även förståelsen som i detta fall, av hur de kemiska egenskaperna är korrelerade med olika typer av omvandlingar.

Multivariat dataanalys styrker analysen och tolkningarna av information från en datatabell på ett sätt som är numeriskt definierat och som är effektivare än manuella, univariata eller bivariata metoder som endast kan behandla en eller ett fåtal variabler åt gången.

Multivariat dataanalys med SIMCA förändrar inte relationen mellan proven utan endast projicera dessa mot en axel eller ett plan som beskriver så stor del av den totala variationen som möjligt.

Traditionell univariat och bivariat bearbetning och presentation av data motsvarar ju en projektion av proverna längs ursprungsvariablerna (axlarna) som oftast inte visar en optimal separation av den befintliga informationen. Principal komponenterna som är definierade att ligga i provernas multidimensionella rymdriktning ger därför möjlighet att enklare tolka resultaten med geologiska termer som tex basisk/felsisk i stället för hög/låg MgO/SiO₂-halt.

Genom att skapa modeller av egenskaper beskrivna med geologiska termer som i detta fall, omvandlingar och dess kemi, kan dessa modeller sedan användas för att klassificera graden och typen av omvandling i ett prov baserat endast på kemiska variabler.

I denna rapport har endast delar av resultaten presenterats för att ge en förståelse av hur en multivariat dataanalys kan bidra till analysen av omvandlingar och dess kemi. Vi har här ej heller presenterat eller använt alla möjligheter som SIMCA-programmet kan bidra med när det gäller att extrahera värdefull prospekteringsinformation ur en datatabell.

REFERENSER

Esbensen, K.H., Wold, S., 1983. GDAM -- An integrated strategy for multivariate geochemical data analysis modelling. SGU ,rapporter och meddelanden nr 34.

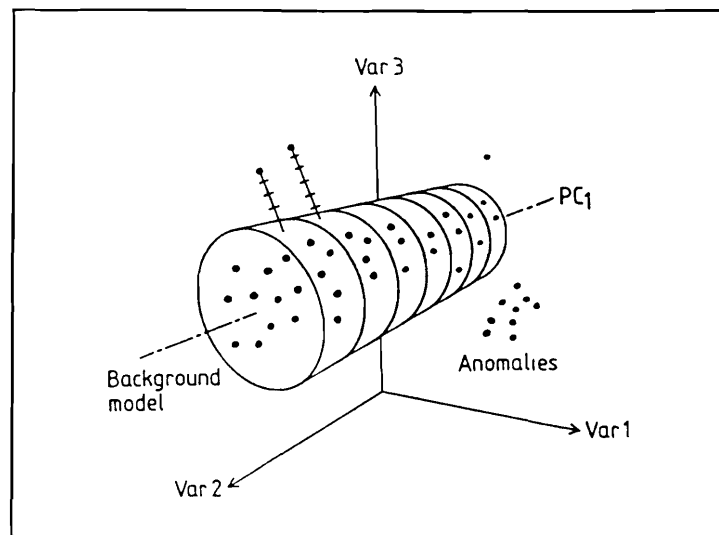
Esbensen, K.H., Lundholm, I., Lindqvist, L., Nisca, D.H., Wold, S., 1985. Geokemi och dataanalys -- Integrated exploration using multivariate modelling of geochemical and petrophysical data. STU 83-5733.

Lindqvist, L., Lundholm, I., 1985, Effektivare prospektering med hjälp av dataanalys. Jernkontorets Annaler, nr 4.

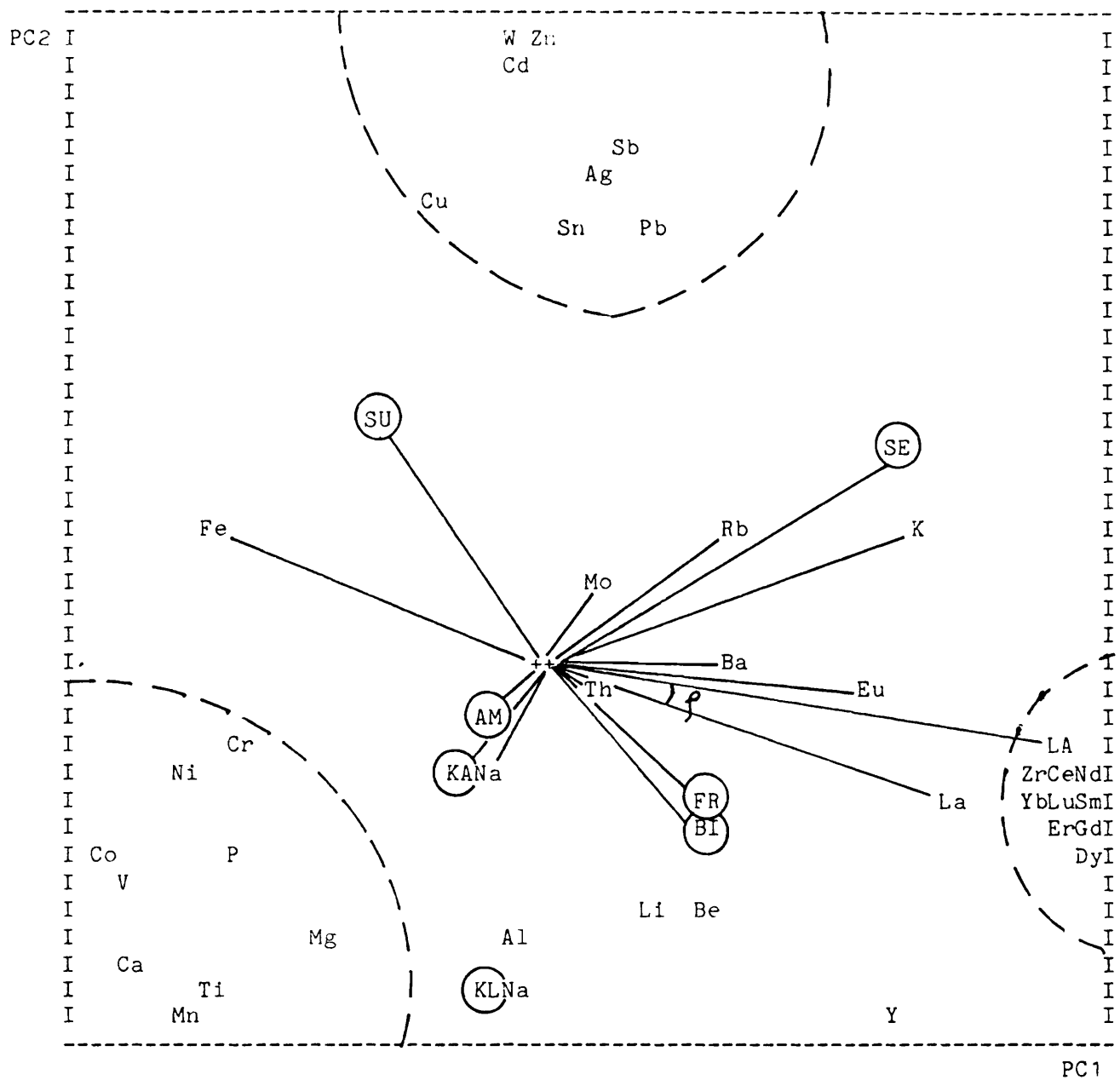
Wold, S., Carlsson, R., Edlund, U., Albano, C., Hellberg, S., Johansson, E., Sjöström, M., 1983. Optimering och analys av flerdimensionella data, Kemisk Tidskrift, nr 14.

Wold, S., Albano, C., Dunn III, W.J., Edlund, U., Esbensen, K., Geladi, P., Hellberg, S., Johansson, E., Lindberg, W., Sjöström, M., 1984. Multivariate data analysis in chemistry. In: Kowalski, B.R. (editor), Chemometrics, Mathematics and Statistics in Chemistry, p 17-95.

Wold, S., 1985. En bild säger mer än tusen siffror. Forskning och framsteg, nr 5.



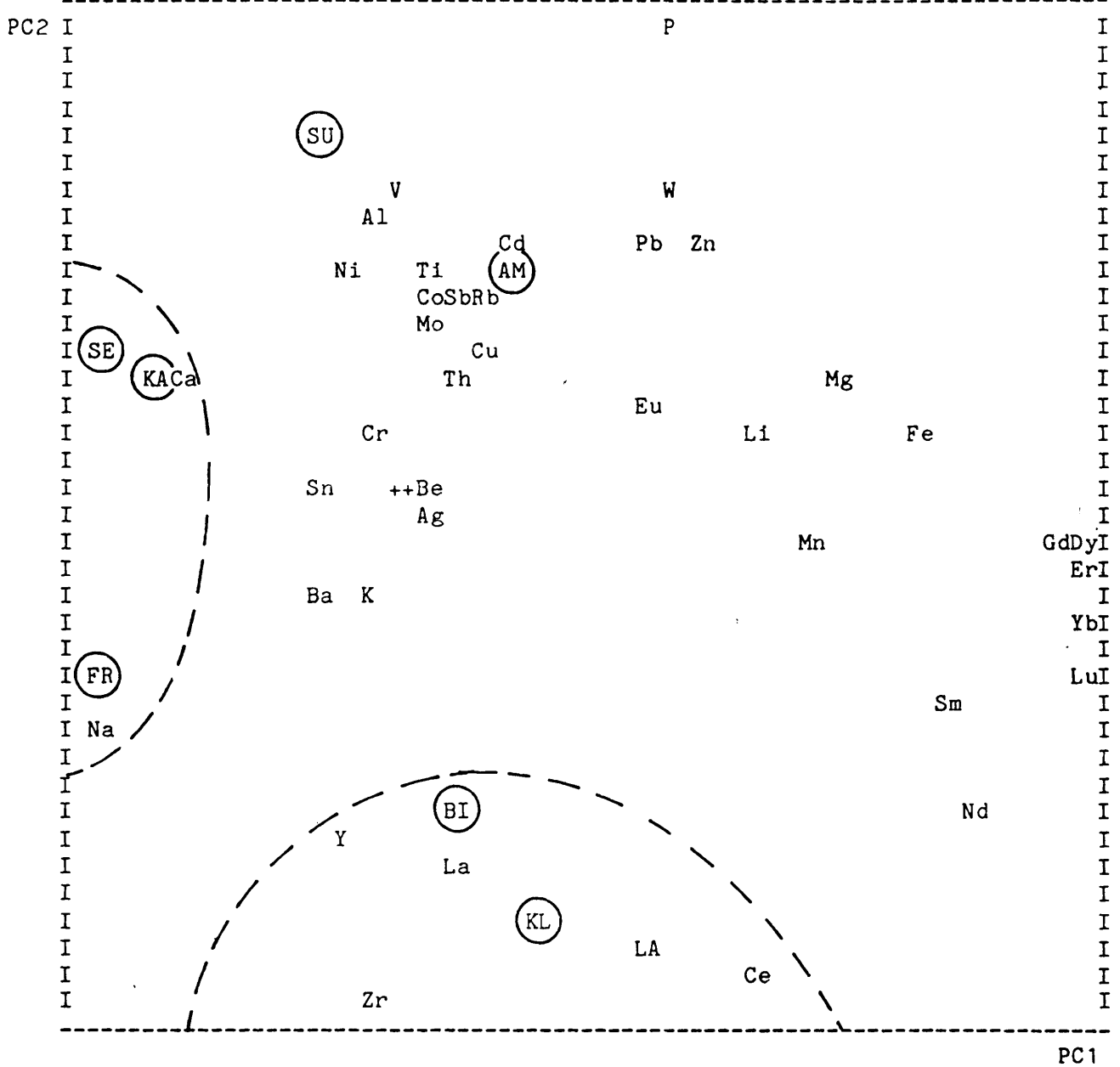
Figur 1: En datavolym karakteriserad av tre variabler och en principal komponent.



PC1: Beskriven varians = 27.6%

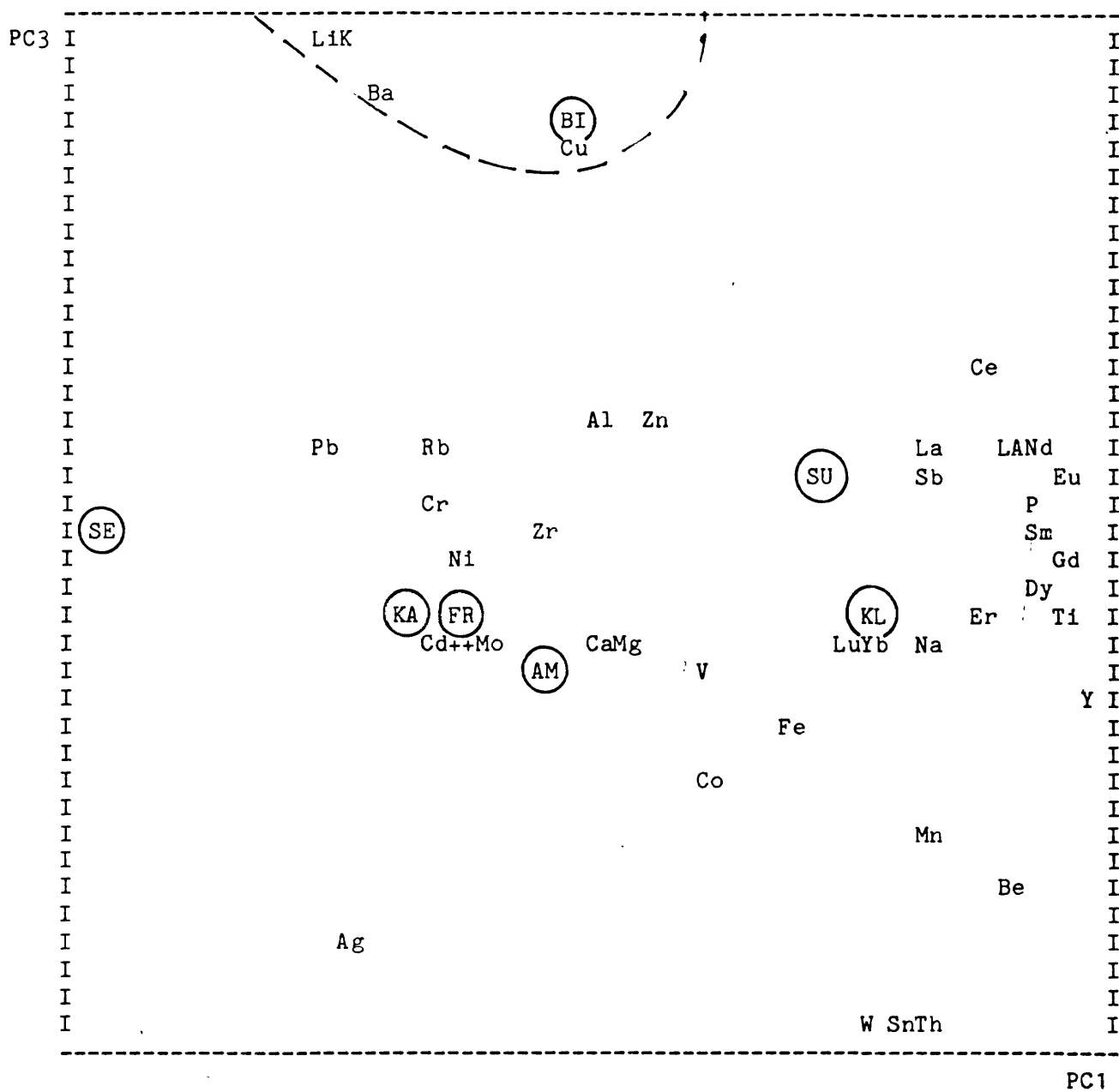
PC2: Beskriven varians = 13.8%

Figur 2: Variabel loading för första och andra komponenten för basiska och felsiska bergarter.



PC1: Beskriven varians = 17.0%
 PC2: Beskriven varians = 12.0%

Figur 4: Variabel loading för första och andra komponenten för felsiska bergarter.



PC1: Beskriven varians = 26.3%

PC3: Beskriven varians = 8.9%

Figur 5: Variabel loading för första och tredje komponenten för basiska bergarter.