

SVERIGES GEOLOGISKA AB
Division Prospektering
Uppdragsgivare: NSG
Projekt: Industrimineral
Ulf Hallgren

PROSPEKTERINGSRAPPORT
Datum: 1988-03-23
ID-nr: PRAP 88505
Best-nr: D 54/87

SILLIMANITGRUPPENS MINERAL
Förekomst och förutsättningar
Konsultrapport

SAMMANFATTNING

Genomgång av andalusit, kyanit och sillimanit. Mineralens mineralogi, kemi och egenskaper. Förekomstsätt. Kort genomgång av svenska förekomster. Marknad, priser och exploatering behandlas liksom förutsättningar för att finna svenska fyndigheter. Bedömning och rekommendationer.

Nyckelord: andalusit, kyanit, sillimanit. Fyndigheter, modeller, marknad.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	Sida
SAMMANFATTNING	1
1. PRESENTATION	4
2. ANVÄNDNING	4
3. EGENSKAPER HOS SILLIMANITGRUPPENS MINERAL	6
3.1 Mineralogi	6
3.1.1 Andalusit	6
3.1.2 Kyanit	7
3.1.3 Sillimanit	8
3.1.4 Övriga mineral	8
3.2 Kemi	9
4. FÖREKOMSTSÄTT	11
4.1 Sillimanitgruppens mineral under metamorfa förhållanden	11
4.2 Andalusit	13
4.2.1 Exempel på andalusitfyndigheter	14
4.3 Kyanit	16
4.3.1 Exempel på kyanitförekomster	16
4.4 Sillimanit	18
4.4.1 Exempel på sillimanitförekomster	18
4.5 Sammanfattning	19
5. SVENSKA TILLGÅNGAR	20
6. MARKNAD	28
6.1 Produktion	28
6.2 Svenska marknaden	30
6.3 Priser	31
6.4 Kvalitetkrav	32
6.5 Exempel från olika producentländer	33
6.6 Exploatering	35
6.7 Olika produktionssätt	36
6.8 Framtida utveckling för eldfasta material	37

	Sida
7. BEDÖMNING	39
7.1 Sillimanit	39
7.2 Andalusit	40
7.3 Kyanit	41
8. LITTERATURLISTA	44

1. PRESENTATION

Sillimanitgruppen omfattar främst mineralen andalusit, kyanit och sillimanit. Alla är aluminiumrika silikater med sammansättningen Al_2SiO_5 eller $Al_2O_3 - SiO_2$.

Mineralens huvudsakliga användningsområde är i eldfasta material (refractories), där de blandade med bindemedel ger materialet väsentligt förbättrade "eldfasta" egenskaper.

Världsproduktionen var 1986 över 550 000 ton med Sydafrika, USA, USSR och Frankrike som största producenter. Konsumtionen av sillimanitgruppens industrimineral är dock huvudsakligen knutna till ett fåtal länder eller områden, högt industrialiserade, med stor järn- och stålproduktion, exempelvis norra Europa med England, USA och Japan.

Sverige förbrukar mellan 2 500 - 3 500 ton/år, vilket huvudsakligen utgörs av importerad kyanit eller konstgjord korund.

2. ANVÄNDNING

Produktionen av eldfasta material är grundad på ett flertal olika industrimineral, som ger produkter vilka skiljer sig åt genom olika egenskaper samt som kan substitueras med varandra.

Eldfasta stenar (formade produkter) och massor (ex murbruk, cementbruk, sprutmassa) kan indelas i följande huvudgrupper:

Aloxidprodukter	(baserad på aluminium)
Chamotteprodukter	(baserad på aluminium)
Silikaprodukter	(baserade på kisel)
Basiska produkter	(baserade på magnesium)
Specialprodukter	

Stålframställning grundar sig på huvudsakligen två processer: Den sura där slaggen främst består av kisel och där materialet i ugnar måste vara silikastenar. Den basiska ger ett

slagg med kalk (CaO) och ugnarna infodras med basiska stenar (CaMg -/ Mg -haltigt material). Andra eldfasta material har egenskaper som ligger mellan de sura och de basiska, så kallade neutrala stenar, främst aloxidstenar och som används i speciella delar av masugnar och stålugnar.

Aloxidprodukter har en halt på minst 45-47 % Al_2O_3 (24 % Al) och de tillverkas av Al -rika leror som kaolin, mineral som bauxit och sillimanitgruppens mineral. Generellt kan konstateras att ju högre Al -halt i råvaran, desto högre eldfasthet får produkten.

I eldfasta murstenar kan sillimanitgruppens mineral utgöra en viktig beståndsdel, exempelvis kan kyanit ingå mellan 10-40 % tillsammans med leror mm för att förhindra krympning. I andra speciella, högeldfasta stenar kan gruppens mineral utgöra huvudbeståndsdel eller aggregat av mineralen vara sågade i lämplig form.

90 % av konsumtionen av sillimanitgruppens mineral går sålunda till produktion av eldfasta produkter, där det viktigaste användningsområdet är till hög-aluminiuminfodringar (> 45% Al_2O_3) i metallurgiska ugnar (50-60 %), glasugnar (40-30 %) och ugnar inom den keramiska industrin (10 %). Huvuddelen är därvid knuten till järn- och stålindustrin. Den framtida användningen av sillimanitgruppens mineral hänger därför intimt samman med utvecklingen inom dessa industrigrenar. Syntetiskt framställda material som syntetisk mullit, kalcinerad bauxit tycks också ta över allt större delar av sillimanitgruppens användning till eldfasta produkter.

I övrigt används gruppens mineral till framställning av slipmedel, till kalkfria golvplattor och till väggplattor. Inom dessa områden har mineralen att tävla med övriga slip- och filtermaterial, oftast billigare som talk, wollastonit etc.

Bland nya användningsområden som nämns är framställning av metallfiberförstärkta keramer för överljudsplan o dyl samt till kiselaluminiumlegeringar genom direktreduktion av högren kyanit.

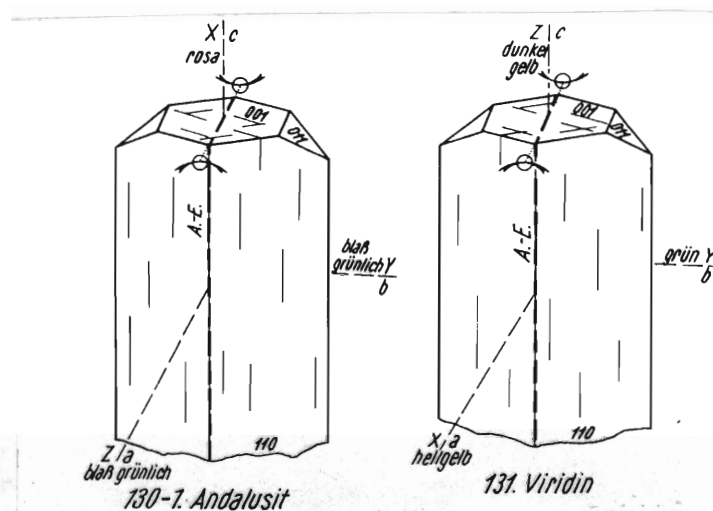
3. EGENSKAPER HOS SILLIMANITGRUPPENS MINERAL

3.1 Mineralogi

De tre vanligaste mineralen i sillimanitgruppen: andalusit, kyanit och sillimanit har alla samma kemiska sammansättning, Al_2SiO_5 eller $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$. De är således polymorfa, dvs har samma kemiska sammansättning men uppträder i olika kristallformer. De är alla genomskinliga till opaka med en glasig eller opallig glans.

3.1.1 Andalusit

Andalusit upptäcktes först i Andalusien, därav också namnet. Mineraliet uppträder vanligen som grova närmast kvadratiske prismor eller också i en mer massiv, radiär form. Oftast är mineraliet skärt till färgen, men även andra färgvarianter, vitt, rödaktigt, gult eller grönaktigt kan förekomma. Andalusit är ett nesosilikat, ö-silikat och mineraliet kristalliserar enligt det rombiska systemet. Hårdheten är mellan 7 och 7.5 i Mohs hårdhetsskala och tätheten är $3.13 - 3.16 \text{ g/cm}^3$.



Andalusit placeras högt i den kristalloblastiska serien (idoblastic order) dvs mineraliet uppvisar vanligen kristallytor mot mineral, som är lägre placerade i serien eller för dessa som inneslutningar.

Andalusit uppträder därför ofta som porfyroblaster i metamorfa bergarter.

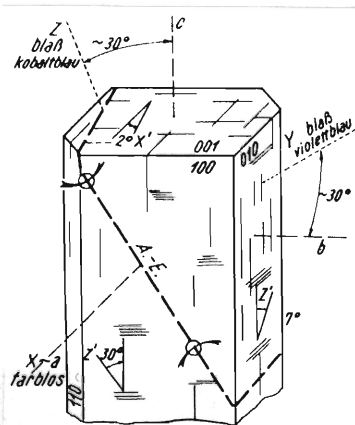
En variant av andalusit är chiastolit, som utmärks av att ett kors eller ett tecken liknande den grekiska bokstaven chi, χ , kan ses på kristallens tvärsnitt. Korset utgörs av mikroskopiska grafitinneslutningar ansamlade i kristallen. Chiastolit bildas vid metamorfos av bitumenösa skiffrar och mineralet har samma användningsområde som andalusit.

En manganförande variant av andalusit, gulgrön viridin, förekommer även sällsynt i Sverige bl a vid Ultevis och i Västana-fältet.

3.1.2 Kyanit

Kyanit uppträder vanligen som kristallaggregat med radiär form eller som sammanväxta/sammankopplade kristallmassor. Färgen är oftast blå, jämför namnet och grekiskans kyanos = mörkt blå.

Kyanit är liksom andalusit ett nesosilikat men till skillnad från detta kristalliserar kyanit i det triklina systemet. Detta har till följd att mineralet uppvisar en karaktäristisk hårdhetsskillnad i olika kristallografiska riktningar; a ; b : 7 och c :4.5 enligt Mohs skala. Mineralets äldre namn, disthen, anspelar delvis på denna skillnad (grekiskans dis-sthenos). Kyanit har tätheten $3.53\text{--}3.65\text{ g/cm}^3$.

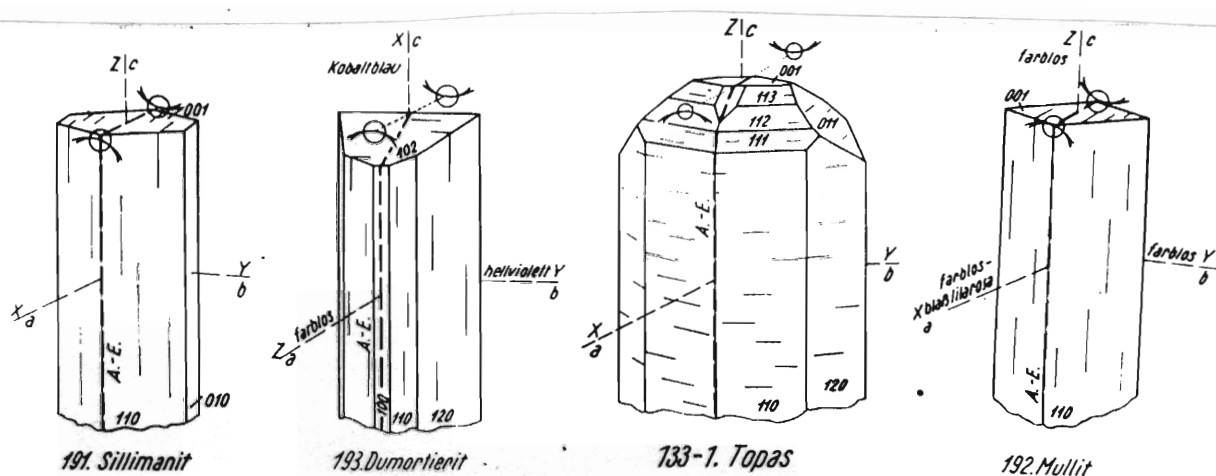


132-1. Disthen

3.1.3 Sillimanit

Sillimanit uppkallades efter en professor vid Yale University, en B. Silliman av dunkel anledning. Mineralen uppträder vanligen i nålform i mer eller mindre fibrösa massor. Dessa nålformiga, filtiga aggregat kallas ofta fibrolit, som antingen är sammanvuxna sillimanitnålar eller mer allmänt en sammanväxning av sillimanit och kvarts.

Sillimanit är vanligen vitaktig, men bruna, ljusgröna till grågröna nyanser förekommer också.



Sillimanit är ett inosilikat, kedjesilikat, och kristalliserar liksom andalusit i det rombiska systemet, men till skillnad från andalusit bildar sillimanit lätt långa kedjor i c:axelns riktning. Mineralen uppvisar således en reglerad tillväxt som motsvarar kristallstrukturen. Jämför med dess vanligen nålformiga uppträdande samt att sillimanit är ett sk stressmineral. Hårdheten är 7 och tätheten $3.20-3.25 \text{ g/cm}^3$.

3.1.4 Övriga mineral

Till sillimanitgruppens mineral räknas allmänt några andra mineral främst pga att de har samma användningsområde.

Dumortierit är uppkallat efter en fransk paleontolog, Du

Mortier. Mineralets kemiska sammansättning är $8 \text{ Al}_2\text{O}_3 \times \text{B}_2\text{O}_3 \times 6 \text{ SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$. Dumortierit är rombiskt, till färgen blått-blåviolett med hårdheten omkring 8.5 och tätheten 3.4 g/cm^3 . Mineralet uppträder oftast som en filtig massa av fibrer.

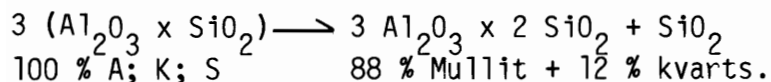
Topas används, förutom till smyckesten, också för framställning av eldfast material. Topas har sammansättningen $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2 \text{ Al(F, OH)}_2 \times 3 \text{ SiO}_2$ och är rombiskt, till färgen gulaktigt, med hårdheten 8 och tätheten 3.5 g/cm^3 .

Mullit är mycket sällsynt i naturen och mineralet intar en särställning inom gruppen som framgår av fortsättningen. Möjligt kan mullit förekomma mer allmänt då det är optiskt mycket lika sillimanit och säkerligen också beskrivits som detta mineral från ett stort antal lokaler. På ön Mull i Skottland har mullit bildats under speciella betingelser, genom stark upphettning av skiffer i kontakt med en intrusiv basalt. Mineralet har också påträffats i xenoliter, exempelvis i skifferbitar som inneslutits i lava. Mullit är rombiskt, vitaktigt och uppträder vanligen fibröst som sillimanit och är oftast ytterst finkornigt, vilket försvårar identifikation och separation. Den kemiska sammansättningen brukar anges till $3 \text{ Al}_2\text{O}_3 \times 2 \text{ SiO}_2$, men mineralet är vanligen ett led i en serie med växlande förhållande mellan Al_2O_3 och SiO_2 ; från 1:1 i sillimanit till ren Al_2O_3 , där naturlig mullit uppvisar kvoter på 3:2 eller 2:1.

3.2 Kemi

I början av 1900-talet upptäcktes att tegel fick väsentligt bättre "eldfasta" egenskaper och även större moståndskraft mot nötning och annan mekanisk påverkan när materialet blandades med kyanit och andalusit istället för med kvarts. De förbättrade "eldfasta" egenskaperna tillskrivs till största delen det ökade innehållet av aluminiumoxid, Al_2O_3 , i teglet. I sillimanitgruppens mineral, $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{SiO}_2$, är det teoretiska aluminiuminnehållet 62.93 %.

Framförallt mullit ger eldfast material utomordentligt "eldfasta" egenskaper. Med mullit får den eldfasta stenen en liten utvidgningskoefficient, motstår nötning och erosion från slag mycket bra. Egentligen är mullit det ideala eldfasta materialet som industrin kräver, men mineralet är tyvärr mycket sällsynt i naturen. Tekniskt sett ligger dock den "eldfasta" kvaliteten hos de övriga mineralen i sillimanitgruppen i att de ombildas till en blandning av mullit och fri kvarts då de bränns (kalcineras) vid temperaturer från 1250°C till 1500°C.



Sönderdelningen av topas och dumortierit ger 95 % mullit, men även som negativ effekt utsläpp av fluor och bor, vilket till stor del hindrat sådan kommersiell produktion av dessa mineral. Man kan därför med fog säga att fyndigheter av sillimanitgruppens mineral utgör så att säga "mullitmalmer".

Det teoretiska värdet Al_2O_3 i sillimanitgruppens mineral (63 %) nås ej i naturliga material pga inneslutna föroreningar som järn, titan eller alkalier. Gruppens mineral är eljest mycket enhetliga i sammansättning, dvs relativt ren Al_2SiO_5 . De vanligaste främmande elementen i mineralens struktur är ferrijoner. Kyanit tar därvid lättare emot Fe^{3+} än exempelvis sillimanit. Andra vanliga föroreningar i mineralen är Cr, V, Ti, Mg och alkalier. I paret andalusit - sillimanit går därvid Cr och V lättast in i sillimanitens struktur.

När sillimanitgruppens mineral rostas ökar produktens volym, för kyanit exempelvis omkring 16 %. Kyanit måste därför brännas till omvandlingstemperaturen 1450°C innan materialet används och formas till eldfasta stenar. Krossad andalusit, 3 % volymökning, kan däremot användas direkt. Det blandas med bindemedel, exempelvis lera med omkring 40 % Al_2O_3 och kalcineras vid 1540°C.

Mullit kan även framställas genom sintring av olika blandningar som innehåller Al_2O_3 och SiO_2 , exempelvis bauxit och kaolin eller alumina och kvartssand. Produkten är känd som synte-

tisk mullit, en produkt som ökar på bekostnad av de naturliga materialen, men som dock ännu utgör en relativt liten del av den totala produktionen.

4. FÖREKOMSTSÄTT

Sillimanitgruppens mineral förekommer allmänt i aluminiumförande metamorfa bergarter över hela världen. De är sålunda mycket typiska metamorfa mineral och är vanliga i skiffrar och gnejser där de uppträder från accessoriska mängder (< 1 %) till huvudbeståndsdel i bergarten (> 20-30 %). De förekommer då vanligtvis tillsammans med sådana mineral som biotit, muskovit, fältspat, granat och även stundom hornblände.

I vissa speciella "kvartsiter" kan dock innehållet av sillimanitgruppens mineral vara väsentligt högre (≈50 %) se sid 16. Typiska ledsagande mineral i sådana förekomster är topas, korund, pyrit, lazulit m fl.

4.1 Sillimanitgruppens mineral under metamorfa förhållande

Om man undantar vittring och sedimentation omfattar metamorfosen alla förändringar som kan drabba bergarter och som ej leder till uppsmältning. De geologiska faktorer som driver metamorfosen kan sammanfattas enligt följande:

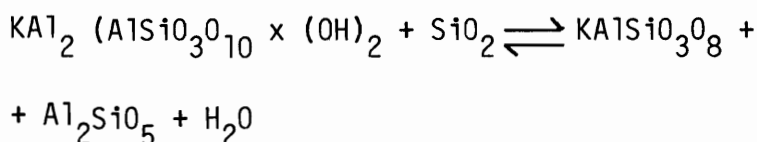
- 1) Ökande temperatur (kontaktmetamorfos).
- 2) Ändrat tryck (stress) efter dislokationer.
- 3) Både ökande tryck och temperatur i orogena zoner (regionalmetamorfos).

Den regionala metamorfosen anses verka från tryck mellan 20 MPa till 1000 MPa, vanligast dock mellan 200-800 MPa och inom temperaturintervallet 200-1000°C, vanligast mellan 300°C till 700°C. Exempelvis börjar sönderfallet av: Kaolingittret vid 450-500°C; klorit sönderfaller vid 600°C; Muskovitgittret

vid 700-750°C.

Vid kontaktmetamorfosen beror förändringen huvudsakligast av förhöjd temperatur. Vid den regionala metamorfosen däremot deltar både förhöjd temperatur och tryck (litostatiskt tryck och stress) i processen. Under de senare förhållandena sker även mer eller mindre stora omflyttningar av element (metamorf metasomatism). Vid dessa processer spelar närvaron av vatten en utomordentligt stor roll. Vattnet (vattenånga över 374°C) underlättar och accellererar omvandlingen genom tryckhöjning och temperatursänkning för reaktioner samt som lösningsmedel och transportör av element.

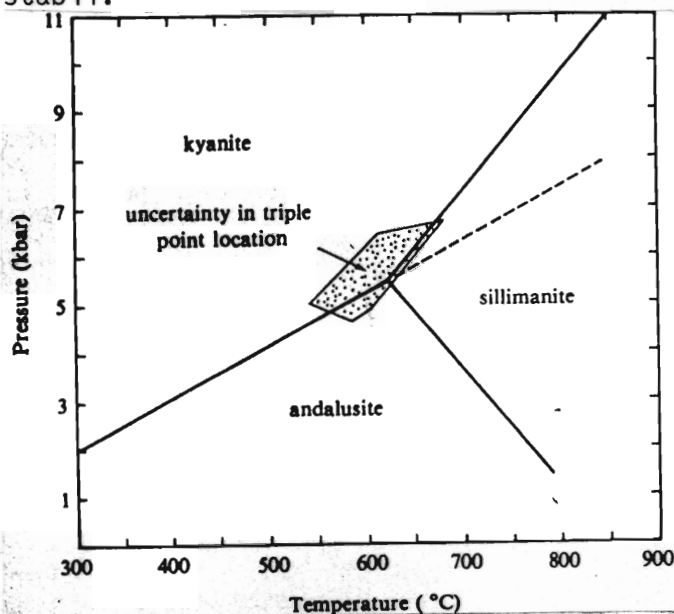
Då det gäller industrimineral bildas exempelvis amorf massiv grafit inom grönskifferfacies; kyanit och sillimanit liksom grövre kristallin grafit omkristalliserar i amfibolit-granulitfacies. Det är, vad gäller gruppens mineral, främst aluminiumrika mineral i lateriter och kaoliniter samt sediment med dessa mineral (bauxit-kaolin-jordar) som omkristalliserar till rika fyndigheter i sillimanitgruppens mineral samt till korund under metamorfosen. Det är dock ej enbart genom omvandling av ovanstående mineral som kyanit, sillimanit och andalusit bildas utan även vid högre metamorfosgrader då en överskottsmängd Al_2O_3 frigörs exempelvis då muskovit sönderfaller till kalifältspat enligt reaktionen:



En reaktion som anses ske vid $P_{H_2O} = 200 \text{ MPa}$ och temperaturen 570°C.

Man har hävdats att Al_2SiO_5 -mineralen bildats vid vissa bestämda tryck- och temperaturintervall. Sålunda anses andalusit vara ett karaktäristiskt mineral för lerrika skiffrar, där metamorfosen skett vid lågt tryck och en temperatur över 500°C, motsvarande < 300 MPa eller ett djup < 10 km, alltså i mycket motsvarande kontaktmetamorfa förhållanden. Sillimanit bildas däremot vid regional metamorfos, högt tryck (300-1200

MPa eller djupet 10-40 km) och vid samma temperatur. Mycken forskningsmöda har under åren satsats för att bestämma P-T-gränserna för sillimanitgruppens tre mineral, varvid särskilt kurvan för andalusit-sillimanit visat sig problematisk. Dessa arbeten har resulterat i en relativt stor spridning för den bekanta "trippelpunkten" i diagrammet med ett "osäkerhetsfält". Dock har värdet av en säker bestämning av trippelpunkten minskat genom att det visats att Al_2SiO_5 -faserna kan existera metastabilt. Metastabil är varje fas som kan existera inom ett temperaturintervall i vilket en annan fas med lägre ångtryck är stabil.



Metastabilitet är vanligen resultatet av att systemet är trögt att initiera bildning av en ny stabil fas, t ex systemet har svårighet att bilda nya kristallisationskärnor eller groddar. Det senare är fallet med de tre mineralen i Al_2SiO_5 -systemet, dvs när en polymorf bildats kan den existera under lång tid metastabilt inom en annan polymorfs stabilitetsfält. Vanligtvis uppträder endast ett av gruppens mineral i bergarter, men pga ovanstående egenskap är det vanligt att 2 av dem samexisterar, även exempel där alla tre finns i samma prov har påträffats.

4.2 Andalusit

Andalusit har ansetts vara ett metamorft mineral som är typiskt

för kontaktmetamorfa förhållanden. Det är aluminiumrika skiffrar som då har omvandlats intill gabbro- och i någon mån granitintrusioner. I dessa bergarter är andalusiten vanligen associerad med cordierit. Då de $3\text{Al}_2\text{SiO}_5$ -mineralens kristallisation huvudsakligast kontrolleras av metamorfosgraden tryck-temperaturförhållanden kan andalusit mer utgöra en kristallfas som kristalliserar i en bergart med passande kemisk sammansättning och vid lämpliga tryck-temperaturer-förhållande än att just vara resultatet av temperaturhöjningen intill en intrusion. Typiskt för andalusitförekomster är däremot att den åtföljande deformationen är ringa. Andalusit kan betecknas vara ett antistressmineral och mineralet förekommer praktiskt taget aldrig i bergarter som utsatts för ett högt riktat tryck (ex shearstress). Flera exempel finns att andalusit omvandlats till kyanit eller sillimanit vid en tryckstegring.

4.2.1 Exempel på andalusitfyndigheter

Betydande andalusitfyndigheter finns i Sydafrika i Transvaal-provinsen, där reserverna av andalusit uppges täcka det nuvarande världsbehovet i minst 500 år.



Figure 95 Location map of andalusite and sillimanite mines in the Transvaal and Cape Province of South Africa.

Andalusiten uppträder här i skiffrar vilka blivit omvandlade vid intrusionen av det stora Bushveldkomplexet. Vittring av sådana primärförekomster har frilagt andalusiten som sedan koncentrerats av vind och vatten. I Sydafrika bryts både de primära skiffrarna och de alluviala förekomsterna och materialet blandas till en säljbar produkt.

Den andra större producenten av andalusit, vid sidan av Sydafrika, är Frankrike där en fyndighet vid Gomet i Bretagne bryts. Andalusiten, omkring 20 vol-%, uppträder här i en ordovicisk skiffer. Även här spelar vittring en väsentlig roll.

En viktig fyndighetstyp utgörs av andalusit i kvartsit, sekundär kvartsit. Dock är andalusit ej så vanlig i denna typ som associationen kyanit-kvarts, se sid 16. Andalusit uppträder i dessa förekomster med följande typiska mineral rutil, lazulit, korund och muskovit. Denna fyndighetsform betecknas även vara en Al-metasomatit där andalusit, kyanit och i vissa fall även dumortierit bildats av kisel och aluminiumoxid, som lakats ur de bergartsbildande Al-silikaterna genom hydrotermala lösningar under både regionala som kontaktmetamorfa förhållande.

Andalusit-kvartsittypen kan även omfatta de fyndigheter som uppträder i anslutning till sulfidfyndigheter i Skelleftefältet och Bergslagen. Lakning och omfördelning av element i sidoberget har här lett till en relativ ökning av Al_2O_3 -halten. Ett liknande bildningssätt skisseras för en s k "glimmerskiffer" i Västanåfältet, med ett Al_2O_3 -innehåll upp mot 26 % och som innehåller både andalusit och kyanit. Det relativa Al-överskottet beror här på att metavulkanitens Ca och Na urlakats och borttransporterats i högre grad än Al vid en tektonisk omvandling. På så sätt har ett relativt Al-överskott uppstått i bergarten, vilket är förutsättningen för att Al_2SiO_5 -mineralen skall bildas vid förhöjd temperatur och tryck.

Andalusit förekommer dessutom i vissa graniter och pegmatiter och kvartsgångar, särskilt kända är förekomster på Kolahalvön, USSR.

4.3 Kyanit

Kyanit är ett typmineral för regionalmetamorfoserade prelitiska sediment och förekommer även fastän mer sällan i psammitiska bergarter. Kyanit uppträder således primärt i kvartsiter, skiffrar och gnejser och bildas företrädesvis under relativt höga temperaturer och tryck under relativt svaga till medelstarka regionalt metamorfa förhållanden. Associerade mineral i dessa bergarter är vanligen granat, korund, staurolit, glimmer samt kvarts.

Kyanit betecknas även vara ett stressmineral, troligtvis behövs ett visst hydrostatiskt tryck för att bilda kyanit medan exempelvis "shearing-stress" ej syns vara väsentligt.

4.3.1 Exempel på kyanitförekomster

USA är den största producenten av kyanit där huvuddelen av produktionen kommer från Piedmont provinsen i Virginia USA. Storleken av reserver uppges vara omkring 30 milj ton kyanit eller omkring 30 % av världens reserver. Alla fyndigheter uppträder inom en relativt smal zon i en större serie av svagt omvandlade vulkaniter och sediment, Virginia Volcanic Slate Belt. Förekomsterna ligger i anslutning till olika sidoberg. Företrädesvis dock främst i glimmerskiffrar eller gnejser men även kvartsiter är vanliga samt även i kvartsgångar och pegmatit.

Kyanit-kvartsiter är viktigast och är den förekomsttyp som är tillräckligt rika och stora för att brytas. Kyanitkvartsiten är här en fin- till medelkornig, ljusgrå bergart med mellan 10-40 % kyanit som i övrigt består av kvarts, muskovit samt de typiska ledsagande mineralen pyrofyllit, rutil, lazulit, topas och lermineral. Bergarten karaktäriseras kemiskt av anomal låg halt kalium och natrium och praktiskt taget frånvaro av kalcium och magnesium. Aluminiumhalten varierar mellan 10 och 25 %, medeltalet är 18 % vilket överensstämmer med de skiffriga bergarter som omger de kyanitförande zonerna. Den allmänna meningen är att dessa kyanit-kvartsiter ursprungligen utgjorts av aluminiumrika sediment (bauxit och/eller kaolinjordar) vilka omvand-

lats vid regionalmetamorfosen till kyanitaggregat. En viss mobilisering av aluminium genom hydrotermal aktivitet kan därvid spelat en viss roll. Mot en tillförsel av aluminium talar i detta fall den nära överensstämmelsen i Al-halt med omgivande skiffrar.

En svensk fyndighet av samma typ är Hålsjöberget i Värmland. Kyaniten uppträder här i dels som körtlar längs "kvartsitens" lagring eller som oregelbundna koncentrationer i den blågrå kvartsiten. Typmineral är även här rutil, lazulit, muskovit, pyrofyllit och pyrit. Likartade är även de mindre förekomsterna vid Dicksberget, Västanåfältet samt även Hökensås.

Kyanit kan även påträffas lokalt som noduler, knotor och större block, segregationer i starkt omvandlade aluminiumrika sediment. Särskilt välkända fyndigheter av denna typ är de indiska exempelvis från delstaten Bihar. Förekomsten Lapsa Buru är berömd för stora, massiva block av kyanit eller kyanit-kvartsit som ligger i en djupvitträd glimmerskiffer. Blocken hittas på eller nära markytan. Även i detta fall är förutsättningen för Al_2SiO_5 -mineralens bildning en lokal omfördelning av kvarts och aluminium under metamorfosen. Knappast någon tillförsel av Al anses ha skett då den sammantagna sammansättningen av kyanitblock och deras sidosten väl överensstämmer med glimmerskiffers sammansättning i stort.

Kyanit i skiffrar och gnejser (primära förekomster) spelar ekonomiskt sett en underordnad roll fastän förekomstsättet är mycket vanligt. Bergarter med kyanit från några procent upp till 25 % täcker hundratal kvadratkilometer flerstädes över hela världen. Otaliga försök har gjorts att tillgodogöra sig kyanit ur sådana bergarter, för närvarande bryts inga primära förekomster. För att en sådan fyndighet skall vara ekonomiskt lönsam för brytning krävs en anrikning genom vittring, dvs djupvittring i ett område med liten relief så att den resistenta kyaniten kan ansamlas på ytan som grus eller block. Dessutom måste det finnas riklig tillgång på billig arbetskraft.

4.4 Sillimanit

Sillimanit är ett mycket allmänt bergartsbildande mineral i metamorfa bergarter av relativt hög facies. Mineralen bildas vid högre temperaturer än de övriga i gruppen och är vanligt förekommande vid både regional- som rörelsemetamorfos.

Bergarten utgörs då ofta av biotit-sillimanit-hornfelseserier eller sillimanit-cordierit-gnejser med ursprung i lerrika sediment och då omvandlingen förorsakats av enbart temperaturhöjning, ex även vid stora intrusioner.

Kvarts-glimmer-sillimanit skiffrar eller gnejser bildas vid den kraftigaste regionalmetamorfa omvandlingen.

Det är allmänt förekommande i omvandlade bergartsserier att sillimanitgruppens mineral växlar med varandra längs ett lager och återspeglar på så sätt de lokala variationerna i tryck- och temperaturförhållande. Mineralen används petrografiskt att indikera den metamorfa intensiteten och att skilja olika metamorfa facies åt.

Vid en temperaturhöjning ersätter sillimanit även tidigare bildade mineral i gruppen, främst kyanit.

4.4.1 Exempel på sillimanitförekomster

Fastän sillimanit förekommer så allmänt i bergarter uppträder det sällan i sådan form att det är brytvärt eller potentiellt exploaterbart. Vanligen uppträder mineralen som fibrolit (se sid 8) som är en filtig, sammangyttring av ytterst fina nålar av sillimanit ofta är även dessa hopflätade med kvarts, glimmer och andra mineral. Att tillgodogöra sig fibrolit har hittills visat sig praktiskt taget omöjligt.

För att bli en brytvärd sillimanitfyndighet krävs, liksom för kyanit, att en vittring och ansamling i klumpar, block och dylikt har skett.

Så är förhållandet i ett flertal fyndigheter i Assam, nordöstligaste Indien. Förekomsterna här utgörs av enorma, flera ton tunga, segregationer av sillimanit och/eller korund, som ligger i en serie av skiffer och gnejs.

Stora förekomster av massiv sillimanit finns i Sydafrika, norra delen av Kapprovinsen. De brytvärda fyndigheterna utgörs av stora rundade, vittrade kroppar av sillimanit-korundförande skiffer i en kraftigt veckad granat-biotitskiffer. Malmen som i medeltal håller 53 % sillimanit, 41 % korund och 6 % övrigt (titanoxid, järn, klorit) består av tätt hopväxt sillimanit och korund med ådror och gångar av nästan ren sillimanit.

I denna del av Sydafrika uppträder även sillimanitskiffrar som oregelbundna linser eller massor i glimmerskiffrar. De är huvudsakligen begränsade till sadlar och tråg i den kraftigt hopveckade bergartsserien. Den renaste sillimaniten uppträder därvid i kärnan av vecken. Trots att dessa förekomster håller mycket goda halter är de för små och uppträder för oregelbundet för att vara ekonomiskt intressanta.

Sillimanit produceras även i Australien där den uppträder som stora block, med 60 % Al_2O_3 i en kaolinlera. Sillimanit utgör dock här i viss mån en biprodukt vid produktion av eldfast lera.

4.5 Sammanfattning

Sillimanitgruppens mineral förekommer sammanfattningsvis i följande 3 genetiska fyndighetstyper (efter Kuzvart 1984).

1) Förekomster med kontaktmetamorft ursprung

Omvandlade lerrika sediment, fossila kaolinjordar m m. Exempel är fyndigheter i Sydafrika (andalusit och sillimanit).

2) Förekomster bildade genom regionalmetamorfos

Av lerrika bergarter, lerrika och bauxitförande sediment. Huvudsakligen kyanit och sillimanit i glimmerskiffrar, gnejsar och kvartsiter. Veckning och även kontaktmetamorfos kan

koncentrera mineralen i fickor och linser, så att rikare fyndigheter uppstår. Primärförekomster. Genom ytterligare vittring och ansamling kan mängden öka så att fyndigheterna blir ekonomiskt utvinningsbara. Exempel från Indien och Sydafrika.

3) Förekomster i sekundära kvartsiter

Aluminium-metasomatiter. Mestadels andalusit och kyanit som bildats av $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ som endera lakats ur de bergartsbildande aluminiumsilikaterna av hydrotermala lösningar eller i bergarter där det relativa $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ -innehållet ökat genom lakning av andra komponenter. Ett typiskt kännetecken för denna typ är att sillimanitgruppens mineral uppträder tillsammans med korund och ledsagande mineral som rutil, topas, lazulit m m. Exempel från USA, Indien.

Utöver dessa 3 fyndighetstyper kan man tillfoga en fjärde grupp:

4) Vittringsförekomster

Uppkommer genom djupvittring av främst primärförekomster. Senare alluvial ansamling kan ytterligare anrika de resistent Al_2SiO_5 -mineralen och göra fyndigheterna brytvärda. Exempel från Indien och Sydafrika.

Till denna grupp kan även tungsandsavlagringar räknas, där sillimanitgruppens mineral utgör en signifikant beståndsdel. Utvinningen av mineralen är oftast en biprodukt till annan produktion.

5. SVENSKA TILLGÅNGAR

Sillimanitgruppens mineral är mycket vanliga i den svenska berggrunden. Vanligast är sillimanit och andalusit i omvandlade lerrika sediment över hela landet.

Kyanit är närmast att betrakta som något av en geologiskt sällsynthet i Sverige.

Sillimanit förekommer således mycket allmänt i metamorfa skiffrar och gnejser över hela landet, möjligtvis något rikligare i Södermanlands- och Hälsingslands skiffrar och gnejser.

Andalusit är även det ett mycket vanligt mineral, företrädesvis i metamorfa sedimentbergarter; exempelvis i Bergslagen, i området mellan Mälaren-Hjälmaren och Norrköping samt intill malmförekomsterna i Västerbotten.

Kyanit är däremot mer sällsynt fastän det är det enda av mineralen som utvinns i Sverige, Hålsjöberg i Värmland. I övrigt är mineralet, i väsentlig mängd, endast känt från några platser i fjällen (Tärnaby och Gäddede); Hökensås vid Vättern samt Västanåfältet.

Då sillimanit och andalusit är så vanliga mineral återfinns uppgifter om dessa mineral mycket lätt i litteraturen. Dock måste man generellt konstatera att uppgifter, som är väsentliga för att bedöma mineralen ur industrimineralsynpunkt, till stor utsträckning saknas. Kemiska analyser av skiffrar och gnejser förekommer, men analyser av mineralen saknas. Vidare saknas ofta uppgifter om mineralens kornstorlek, i enstaka fall anges att grov sillimanit eller andalusit föreligger samt att mineralet är poikilitiskt, dvs innehåller rikligt med inneslutningar (föröreningar).

Följande redovisning av förekomster i Sverige av sillimanitgruppens mineral är mycket översiktlig. Anledning till detta är dels att sillimanit och andalusit är så allmänt förekommande i metamorfa skiffrar och gnejser (primärförekomster) och för att sådana förekomster måste bedömas vara av litet intresse ur ekonomisk synpunkt.

Norrbottnen

Inom Pajala-Tärendö-området förekommer sillimanit och andalusit i den s k Pahakurkkiogruppens sediment, exempelvis vid typlokalerna längs Kalixälv. Delvis kan andalusiten uppträda som cm-stora porfyroblaster och sillimanit förekommer som ca 4 cm stora kärvar. Andalusiten uppges vara starkt poikilitisk.

Från Gällivareområdet rapporteras sillimanitförande gnejser.

Någon undersökning av mineralen har troligen ej företagits i Norrbotten. Säkerligen är mängden andalusit och halten Al_2O_3 för låg i bergarterna. Den stora mängden inneslutningar i mineralet gör att man ej kan erhålla en godtagbar kvalitet.

Västerbotten

I Skelleftefältets omvandlingsbergarter förekommer andalusit i stor mängd. Välkänd är den s k andalusitfelsen i Bolidengruvan. Bergarten bröts under kriget som råvara för aluminiumframställning. Då brytningen upphörde 1945 fanns 96 000 ton känd andalusitmalm, med 50-55 % Al_2O_3 , kvar i gruvan.

Inom detta område finns ytterligare kända andalusitrika förekomster. Mångfallsbergets sulfidmalmsanledning, 2 km norr om Boliden, omges av en korundförande andalusitfels med halter upp till 70 % Al_2O_3 .

Det finns även andra förekomster av andalusit inom Skelleftefältet, men de två ovannämnda är de som uppvisar de högsta Al -halterna. Från Kristinebergssfältet samt fortsättningen invid Nyborgsstråket rapporteras "andalusitkvartsiter" med upp mot 25 % Al_2O_3 . Andalusitporfyroblasterna är emellertid poikilitiska. I en rapport (PRAP 85076: Mikroskopisk undersökning av rågods och anrikningsprodukter från en andalusit-sillimanit-mineralisering) anges att andalusiten håller inneslutningar av främst kvarts och ilmenit i storleksordningen 0.007-0.035 mm (dvs 325 mesh), vilket sannolikt måste leda till en dyrbar nedmalning för att kunna nå en kvalitetsmässigt kommersiell produkt.

Fjällen

Från fjällkedjan rapporteras att sillimanitgruppens mineral uppträder relativt allmänt, accessoriskt i olika skiffrar. Vid Tärnaby och Muruhatten i Gäddede uppträder även kyanit i något större mängd, men även här i för liten mängd för att vara eko-

nomiskt intressant, omkring 3 vol-%.

Västernorrland och Gävleborgs län

Omvandlade bergarter av sedimentärt ursprung, skiffrar, gnejser och migmatiter är vanliga i hela området, speciellt i norra Hälsingland och i kusttrakterna.

Sillimanit rapporteras från hela området och det förekommer i små mängder i gråvackegnejser samt stråkvis i glimmerskiffer och mer kvartsitiska bergartsled. Sannolikt uppträder sillimanit i allt för små mängder och i form av fibrolit, vilket gör det ointressant ur industrimineralsynpunkt.

Av särskilt intresse är dock en fyndighet vid Kölaberget, där en sillimanit-topasfels uppträder i m-breda zoner omväxlande med kvartsrika partier. De rikaste delarna håller 61 % Al_2O_3 . Den sillimanitkvartsit som omger Enåsens guldgruva är också värd att notera.

Los-seriens glimmerskiffrar håller ställvis upp mot 30 % andalusit och/eller cordierit. Vanligtvis är mineralen starkt poikilitiska vilket sannolikt gör kvaliteten oacceptabel.

Block av skiffer med renare andalusit har emellertid påträffats i Losområdets södra del. De har ej närmare undersökts.

Bergslagen

Enligt samtliga sammanfattande verk över malmer och bergarter inom Bergslagen är förekomsten av andalusit och sillimanit mycket allmän i skiffrar och gnejser av sedimentärt ursprung. Andalusit ingår även i de omvandlingsbergarter, malmkvartsiter, som uppträder i samband med områdets sulfidmineraliseringar. Andalusiten förekommer då vanligen tillsammans med cordierit.

Dock kan man mer sällan finna mer uttömmande beskrivningar av mineralen, de inskränker sig vanligen till allmänna kortfattade formuleringar om uppträdande, mer sällan om kornstorlekar och sammansättning.

Som exempel på en förekomst med grövre andalusit kan Nya- och Gamla Bastnäsområdet nämnas. 15-20 cm (i undantagsfall 80 cm) långa andalusitindivider uppträder här. Dock är de poikilitiska och kristallerna sägs vara "förstörda" av rikligt med glimmerinneslutningar.

Södermanlands län m fl

Området kring Mälaren och Hjälmaren upptas till stor del av omvandlade sediment i form av skifferar och gnejser, vilka allmänt för både sillimanit och andalusit.

Vanligen är mineralen finkorniga, men grövre andalusitindivider, porfyroblaster 1-3 cm, kan förekomma relativt allmänt, dels som spridda individer eller som mer eller mindre sammanhängande andalusitskikt. Exempel på detta är ett större område norr om Glanshammar där andalusit är ett huvudmineral i berggrunden. Ofta uppträder andalusit tillsammans med cordierit. Sillimanit uppträder mest som finkorniga fibriga aggregat, som nålar eller kärvar.

I skifferområdet söder om Hjälmaren och mot öster är de två mineralen mycket vanliga, även grov andalusit har ställvis påträffats, 3-4 cm, men poikilitiskt. I området öster om sjön Silen och söder om Gnesta dominerar berggrunden av sedimentgnejser ofta med rikligt inslag av flera aluminiumrika karaktärsmaterial, cordierit, sillimanit, andalusit och granat. I de grå sedimentådergnejserna är mineralen här vanligen ej synliga för ögat utan ses först i mikroskop som en fingrynig massa. Sillimanit uppträder även mycket ofta som inneslutningar i cordierit.

Söder om Nyköping mot Bråviken, Kolmårdsområdet, är även sillimanit och andalusit vanliga mineral, ställvis kan mängden uppgå till 5-7 vol-% av bergarten, dock allmänt starkt poikilitiska.

I Norrköpingsområdet uppträder sillimanit vanligen endast som ett accessoriskt mineral och då oftast i form av fibrolit tillsammans med biotit. Andalusit förekommer även som grövre individer, exempelvis i området omedelbart väster om stadens cent-

rum, där rikligt med 5 cm stora andalusitindivider uppträder i en glimmerskiffer.



Fig. 4. Glimmerskiffer med fläckar av andalusit. Vattenverket i Norrköping. 300 m NV om Borgs säteri (9d). Foto K.-A. Kornfält.
Mica-schist rich in andalusite

SGU Ser Af nr 108. Beskrivning till berggrundskartan Norrköping NV.

I trakterna norr om Mälaren förekommer sillimanit i flertalet glimmerskiffrar, vanligen av fibrolittyp och som når tillsammans med muskovit och kvarts. Mineralen uppträder sällan i större mängder men halten kan lokalt uppgå till 5 vol-% och i ett enstaka fall har 17 vol-% noterats.

Andalusit är här företrädesvis knuten till muskovit-biotit-glimmerskiffrar där migmatitiseringen ej varit så hög. Mineralen är ofta anrikat i zoner där flera cm-stora porfyroblaster kan uppträda, exempelvis vid Arlanda flygplats. Individerna innesluter vanligtvis stora mängder kvarts, plagioklas och biotitfjäll i intervallet 0.02-0.1 mm (175 mesh). Här och var ersätts andalusit av cordierit.

I sedimentgnejserna på Södertörn och Stockholms södra skärgård är sillimanit och andalusit mycket allmänna mineral, oftast i finkornig form men cm-stora andalusitpoikiloblaster med kvarts-, plagioklas- och biotitinneslutningar är kända från exempelvis Utö och intilliggande öar.

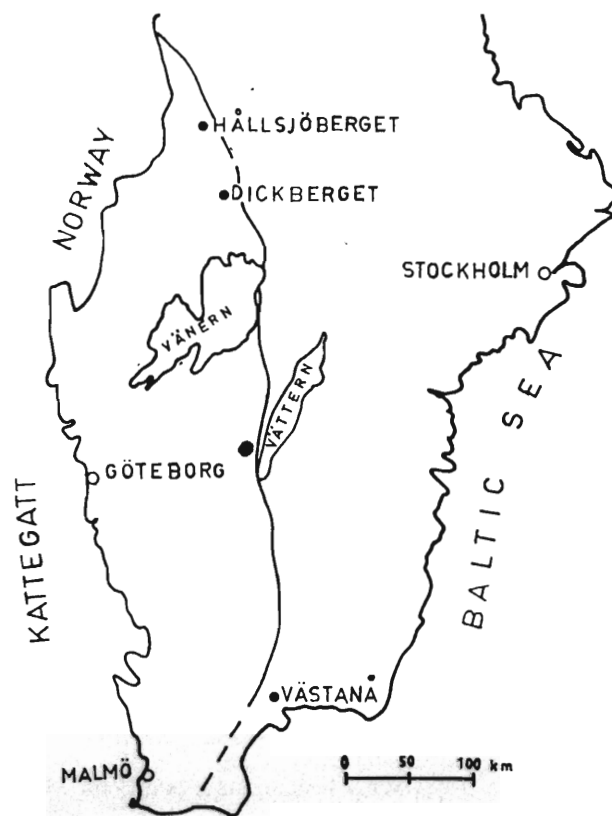
Västra Sverige

Uppgifter om gruppens mineral från västra Sverige är mycket sparsamma, sålunda finns inga noteringar från exempelvis Stora Le-Marstrandsserien, förmodligen för att inga av gruppens mineral uppträder i denna.

Med undantag för en förekomst av kyanit i pegmatit i Göteborgstrakten (närmast en mineralogisk kuriositet) rapporteras endast kyanit från Hökensås, Björnåsen, väster om Vättern. Blåaktig kyanit i grövre kristaller uppträder här i sedimentgnejs. Utredning är gjord över fyndigheten av R. Stanfors för Tändsticksbolagets räkning på vars mark fyndigheten ligger. Förekomsten betecknas som liten.

Till västra Sverige torde även fyndigheterna Hålsjöberg och Dickberget räknas med sitt läge omedelbart väster om den s k protoginzonen.

Lätt tillgängliga beskrivningar av fyndigheterna är relativt åldersstigna och ej särskilt uttömmande. De måste dock betecknas som typiska "kyanit-kvartsiter". Hålsjöberg behandlas på andra platser i denna rapport, se sid 17 och 41-42.



Västanåfältet

Förekomsten av andalusit och kyanit har varit känd i Västanåfältet sedan sekelskiftet. Kyaniten uppträder dels som korta mer eller mindre subhedrala korn dels som cm-stora kristallindivider. Mineralen förekommer i både sediment och vad som betecknas metavulkaniter. Angående fyndighetens bildning, se sid 15. I vissa delar rapporteras bergarten hålla nära 50 vol-% av kyanit och andalusit i vad som kallas glimmerkvartsit. Denna bergart uppges dessutom hålla lazulit som accessorie, jämför "kyanitkvartsiter". SGUs kartering visar dock att sådana halter är sällsynta. Tidigare kända lokaler med de uppgivna halterna har visat sig vara blockfynd, varför fyndigheten bedömts ha ringa ekonomiskt intresse.

6. MARKNAD

6.1 Produktion

Eftersom eldfasta produkter är den helt dominerande marknaden för sillimanitgruppens mineral har situationen för dessa varit mycket pressad pga stålindustrins långvariga kris i industri-länderna. Dock har medel- och högaluminium tegel, dit sillima-nitgruppens produkter hör, klarat sig något bättre än lågalumi-niumprodukter som exempel eldfasta leror. Även syntetisk mullit (kaolin/bauxit blandningar) har tagit marknadsandelar i I-län-derna.

Fastän, som framgått, gruppens mineral geologiskt sett är utom-ordentligt vanliga i metamorfa bergarter över hela världen så är produktionen begränsad till några stora producentländer: Sydafrika, USA, USSR, Indien och Frankrike samt några mindre Spanien, Australien, Brasilien samt från 1986 även Sverige. Världsproduktionen låg relativt konstant, omkring 350-400 000 ton/år under hela 1970-talet, ökade 1979-80 till över 500 000 ton/år för att minska 1982-83 till 440 000 ton/år och har ökat under 1986 till över 555 000 ton/år. Det senare beror till största delen på ökad andalusitproduktion i Sydafrika och Frankrike samt ökad produktion av sillimanit i Indien som bi-produkt till tungsandstensindustrin. I någon liten mån även genom Sveriges inträde med Svenska Kyanit AB, Hålsjöberg.

De största producenterna är Sydafrika med ca 35 % av produktio-nen, USA 20 %, USSR 17 %, Indien 14 %, Frankrike 10 %, övriga 1-2 %. Kyanit utgör därvid nära hälften av produktionen, 48 % av gruppens mineral, andalusit något mindre 44 % och resterande 8 % av sillimanit. Man har beräknat att omkring hälften av den totala produktionen omfattas av internationell handel, där Sydafrika, USA och Frankrike svarar för huvuddelen v exporten. Tidigare hade Indien en betydande del av världsmarknaden, ca 45 % med sina eftertraktade kvaliteter av massiv kyanit och sillimanit. Sedan slutet av 1970-talet råder emellertid exportstopp för dessa produkter i Indien, dels för att skydda de minskande reserverna dels för att trygga det inhemska beho-vet. Produktionen i Brasilien går även den till den inhemska

förbrukningen.

Världsproduktion tusen ton (ca)

	1974	1981	1986
USA	90 (k) ¹⁾	115 (k) ¹⁾	115 (k) ¹⁾ 9 (a) ²⁾
USSR	70 (k) ¹⁾	70 (k) ¹⁾	100 (k) ³⁾
Sydafrika	60-65 (a)	181 (a)	191 (a)
	20 (s)	15 (s)	1.3 (s)
Indien	55 (k)	38 (k)	40 (k)
	5 (s)	10 (s)	40 (s)
Frankrike	10 (a)	30 (a)	55 (a)
Spanien	5 (a)	7 (a+k)	5 (k)
Brasilien	-	4 (k)	5 (k)
Australien	-	0.3 (s)	7 (s)
Sverige	-	-	10 (k)
	320	470	580

(k) = kyanit

(a) = andalusit

(s) = sillimanit

1) Inkluderar även något av gruppens andra mineral

2) Dessutom produceras i USA ca 400 000 ton kalcinerad gibbsitisk kaolin (Mulcoa 47; 60; 70) med 47 %; 60 % resp 70 % Al_2O_3 -innehåll, vilket gör att andalusit har svårt att vinna insteg på USA:s marknad.

3) Mycket osäkra bedömningar från Öststaterna.

Såtlunda uppges Tjeckoslovakien ha en kapacitet av 75 000 ton/år och Rumänien ha en kapacitet av 70 000 ton/år.

Kina håller på att bygga upp en industri baserad på gruppens mineral.

På importsidan dominerar Japan, Storbritannien, Förbundsrepubliken Tyskland samt Italien.

6.2 Svenska marknaden

De eldfasta produkterna och handeln med dessa i Sverige är mycket svåröverskådlig pga mångfalden olika produkter och genom att dessa framställs ur ett flertal olika råvaror och ur blandningar av dessa. Som Mineralpolitiska utredningen (SOU 1977:75 Industrimineral) framhöll är dessutom den svenska statistiken på detta område mycket oklar och ofullständig. Exempelvis göms sillimanitgruppens mineral i statistiken under rubriken "andra eldfasta ämnen" eller redovisas aluminiumoxid för eldfasta ändamål som konstgjord korund (slipmedel).

Under åren i början av 1970-talet förbrukade Sverige ca 2 500-3 500 ton/år av kyanit till eldfasta specialstenar. Förbrukningsnivån bedömdes av MPU ligga lika högt år 1985, dvs omkring 2 700 ton/år. Några nya uppgifter än de som publicerades i utredningen har ej tagits fram. Som MPU då påpekade förväntades ej förhållandena för de eldfasta materialen nämnvärt förändras fram till 1985, snarast spåddes en sjunkande förbrukning pga strukturrationaliseringen inom stålindustrin i Västeuropa, vilket även inträffat och som för närvarande pågår. 60-80 % av förbrukningen av dessa eldfasta råvaror ställs i relation till stålindustrin.

I början av 1970-talet var Sverige helt hänvisat till import främst från Indien (nu upphörd), USA och Sydafrika. Genom produktionen vid Svenska Kyanit AB, Hålsjöberg täcks en del av det inhemska behovet och en viss export kan även ske (till England, Frankrike, Danmark m fl).

Tabell 5:12 Råvaruförbrukning för inhemska framställning av eldfasta stenar och massor 1974

	Kvantitet Tusen ton	Inköpsvärde Milj kr	Inhemska försörjning %
Dolomit	136,0	6,0	100
Kvartsit	55,0	1,5	100
Kaolin	33,0	1,6 ^a	65
Chamotteleror	45,0	2,7 ^a	100
Eldfast lera annan än kaolin	23,0	4,0 ^a	0
Bauxit	13,0	5,2	0
Kyanit	2,8	1,7 ^a	0
Aluminiumoxid	2,7	1,2 ^a	0
Aluminatcement	2,5	1,7 ^a	0
Magnesit	0,2	0,1	0
Summa inköpsvärde ca		26,0	

^a Uppskattade värden.

Om relationen mellan råvarorna till eldfasta stenar och massor är liknande nu som år 1974 (se tabell SOU 1977:75) så utgör sillimanitgruppens mineral icke fullt 1 % av kvantiteten råvara och omkring 6.5 % av värdet.

6.3 Priser

Sillimanitgruppens mineralprodukter prissätts på ett jämförbart sätt över hela världen, efter det att transportkostnader tagits i beaktande. Priserna har i fast penningvärde legat praktiskt taget still sedan 1973.

Priser för några vanliga produkter var vid 1987 års slut:

Andalusit, Transvaal 52-54 % Al_2O_3 , bulk CIF 70 pund
motsvarande 700 SEK/ton CIF Europa.

Andalusit, Transvaal 60 % Al_2O_3 CIF 90 pund
motsvarande 900 SEK/ton CIF Europa.

Kyanit, USA, 59-62 % Al_2O_3 , 35-325 T-mest raw/calced, 18 ton lots CIF 90-155 pund
motsvarande 900-1 550 SEK/ton CIF Europa.

US-Kyanit FOB plant CL.

Raw 70-137 US dollar motsvarande 463-906 SEK/ton FOB

Calcined 123-172 US dollar motsvarande 738-1 032 SEK/ton FOB.

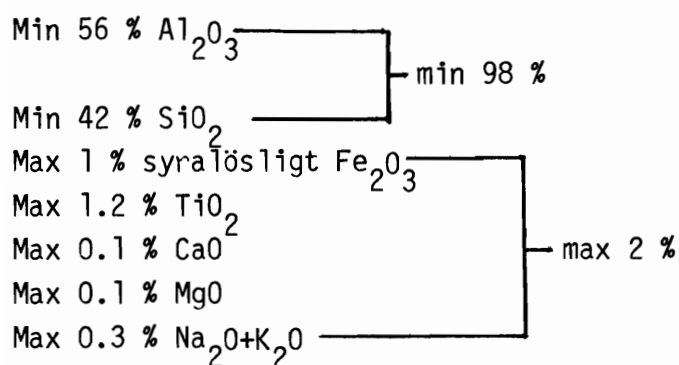
Sillimanit, South African 70 % Al_2O_3 Bags CIF 190 pund
motsvarande 1 900 SEK.

Variationer förekommer inom intervallen beroende på kvalitet och köpt kvantitet. Utan en markant förbättring inom järn- och stålindustrin kommer det ej att ske någon förbättring vare sig i priser eller i konsumtion för sillimanitgruppens mineralprodukter.

6.4 Kvalitetskrav

Som en ledtråd vid bedömning av svenska förekomster och eventuell möjlighet till exploatering ges en kortfattad genomgång av olika producentländers kvalitetsspecifikationer och elementinnehåll i saluförda produkter.

För amerikanska förhållanden krävs allmänt att kommersiella kvaliteter av kyanit skall innehålla:



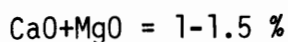
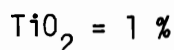
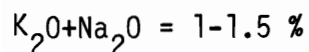
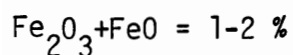
För USAs del saluförs kyanitprodukterna i följande kornstorlekar:

35 - 48 - 100 - 200 - 325 Tyler mesh

0.5 - 0.3 - 0.15 - 0.075 - 0.045 mm

För att uppnå hög tryckstyrka hos produkten (murstenar) krävs dessutom att 60 % skall vara relativt grovkornig.

I europeisk litteratur anges oftast att föroreningarna, som mestadels utgörs av biotit och fältspat, maximalt får uppgå till 2 %, enligt formeln $R_2O_3+R_2O+RO = 2 \%$, som därvid kan utgöras av:



Som ett "ledtal" uppges vidare att bergarten eller malmen för sillimanitgruppens mineral som ett minimum bör innehålla:

Andalusit: 2-6 % (som efter anrikningsprocesser ger ett koncentrat av minst 60 % Al_2O_3)

Sillimanit: 10 %

Kyanit: 5-7 % (koncentreras till 60 % Al_2O_3).

Dock måste dessa siffror säkerligen ange en mycket lättbruten, vittrad förekomst.

6.5 Exempel från olika producentländer

Sydafrika

I Groot Marico-Zeerustområdet, Transvaal, produceras en relativt lågkvalitetsandalusit, omkring 40 000 ton/år med 53-54 % Al_2O_3 och med 1.5-2 % Fe_2O_3 . Se karta sid 14. Ifrån andra förekomster i Transvaal bryts högklassig andalusit ur en vittrad glimmerhornfels. Andalusiten kan utgöra 10-15 vol-% av bergarten och koncentratet (flotation och magnetseparation) håller 59-60 % Al_2O_3 och 0.6 % Fe_2O_3 . I Lydenbergsområdet, nordligaste Transvaal, bryts en lerbergart med ca 8 % andalusit och koncentratet håller 59-60 % Al_2O_3 samt 0.9 % Fe_2O_3 .

Sillimanit, som bryts i norra delarna av Kap-provinsen, utgör ca 53 % av vittrade och anrikade skiffrar och gnejser. Övriga delar är 41 % korund och resterande 6 % utgörs av TiO_2 , Fe_2O_3 samt klorit.

USA

USAs produktion av kyanit kommer närmast helt ur kyanit-kvart-siter som håller mellan 10 till 40 vol-% kyanit. Denna malm

floteras allmänt till ett koncentrat med ca 91 % kyanit och genom magnetseparation begränsas Fe_2O_3 -innehållet till mindre än 1 %. Från Piedmont Mountains produceras dessutom en eldfast kvalitet som håller 50-60 % andalusit ur en bergart vars Al_2O_3 -innehåll är omkring 34-36 %. Man strävar här att få fram en produkt med högt andalusit-innehåll och Al_2O_3 -halten 60 %.

Frankrike

I Bretagne bryts en ordovicisk skiffer som håller 14-15 % andalusit. Omkring 50 000 ton/år bryts, malmen magnetsepareras och tungmineral avskiljs till två kvaliteter 59 % Al_2O_3 respektive 53 % Al_2O_3 . Se även sid 37.

Brasilien

I Brasilien utvinns kyanit ur eluviala fyndigheter som innehåller i medeltal 25 % kyanit, 20 % granat, 15 % muskovit, 10 % kvarts och 3 % lermineral och järnoxider. En produkt med 58 % Al_2O_3 saluförs i tre kornstorlekar.

Indien

Den massiva kyaniten och sillimaniten från Indien förekommer i så stora block att de kunnat "handplockas", sedan eventuellt sågas till lämplig storlek för eldfast användning. Kyaniten marknadsförs därefter i tre kvaliteter med mellan 50 % och 59 % Al_2O_3 .

Den indiska kyaniten uppträder oftast i filtiga, nålformiga sammankopplade kristallaggregat, som är volymbeständiga. Vid kalcinering bildar den ett vitt, tätt aggregat som kan bearbetas. Grova kyanitkristaller från andra fyndigheter faller däremot lätt sönder vid bränning. Just denna egenskap hos den indiska kyaniten gjorde den mycket eftertraktad av de europeiska förbrukarna.

Sverige

Den produkt Svenska Kyanit AB framställer vid Hålsjöberg håller i medeltal 59.8 % Al_2O_3 och med relativt låga mängder föroreningar. Dock är järninnehållet omkring 1.3 % Fe_2O_3 , dvs något högre än det krav på < 1 % som anges för amerikanska produkter. Företaget poängterar dock att detta är inklusive järn bundet i gittret och att halten syralösligt järn är väsentligt lägre.

6.6 Exploatering

I litteraturen diskuteras och man kan sammanställa olika villkor eller kriterier, som bör vara uppfyllda eller som man måste ta hänsyn till och noggrannt undersöka vid utvärdering av olika projekt med sillimanitgruppens mineral.

I första rummet betonas, särskilt i amerikansk litteratur, transportkostnaderna som mycket väsentliga. Gruppens mineral förbrukas huvudsakligast av de högt utvecklade industriländerna och även inom dessa inom relativt begränsade områden. Produkterna måste därför kunna levereras till förbrukarna så konkurrenskraftigt som möjligt gentemot andra råvaror för eldfasta material. Detta gäller väl även till del europeiska förhållanden om än ej i så hög grad då även en stor del av de andra konkurrerande råvarorna, exempelvis bauxit, även importeras och måste transporteras längre sträckor. En utvecklingslinje syns dock vara att hela denna del av marknaden gått över från lokala råvaror till en omfattande internationell handel med specialprodukter.

De blivande kostnaderna för transport till förbrukarna är därför ett viktigt inledande övervägande vid varje undersökningsprojekt av gruppens mineral. Vid ett eventuellt svenskt projekt talar snarast transportkostnaderna till vår fördel, närhet till egna förbrukare och den europeiska marknaden.

En annan viktig förutsättning, som måste utredas, är möjligheten att producera en säljbar produkt. Förbrukare av sillima-

nitgruppens mineral är erkänt petiga då det gäller uppställda krav för råvaror som används för att tillverka eldfasta stenar och massor. Varje avvikelse hos en ny produkt från godkända specifikationer gör det extra svårt för denna att komma in på marknaden.

Förutom en noggrann analys av produktens elementinnehåll är också en bestämning av kornstorleken för att frigöra Al_2SiO_5 -individerna och därmed kunna nå en godtagbar halt av föroreningar av yttersta vikt. Många rika fyndigheter kan ej exploateras därför att de kräver en alltför kostsam nedmalning för att nå uppställda kvalitetskrav. En nedmalning till < 200 mesh (0.075 mm) är sannolikt ej lönsam då de flesta producenter, exempelvis av kyanit i USA, kan få fram en godtagbar produkt i kornstorleksområdet 0.5 mm (35-28 mesh).

Om en inledande undersökning visar att fraktkostnader och främst kvalitet är konkurrensmässiga återstår en detaljerad prospekteringsundersökning: genom detaljkartering, provtagning på ytan (grävning av diken och gropar) och en begränsad diamantborrning. Geokemiska och geofysiska metoder lämpar sig vanligtvis ej för denna typ av fyndigheter.

Nästa steg efter det att fyndigheten undersökts, potentiella marknader bestäms och en undersökning utförts att en konkurrenskraftig produkt kan tillverkas och levereras, är att producera materialet i försöksanläggning (pilot-plant-scale). Laboratorieförsök i bänkskala är ej tillräckligt. Det framhålls som mycket viktigt att tillverka en tillräckligt stor mängd av produkten ur en representativ del av fyndigheten genom pilot-försöksteknik, så att en tilltänkt förbrukare tillåts pröva materialet i sina processer. Fler exempel ges, från USA och Kanada, där misslyckade satsningar gjorts genom att anläggningar byggts upp, sedan har man ej funnit köpare till produkten.

6.7 Olika produktionssätt

Förutom de massiva kyanit- och sillimanitförekomsterna i Indien måste i regel malm från sillimanitgruppens fyndigheter

anrikas för att man skall erhålla en säljbar produkt. Dessa koncentrat framställs vanligtvis genom flotation och magnetseparation.

Nedan ges kortfattat två exempel på olika produktionssätt:

Kvarts-kyanitförekomsterna i Virginia, USA, som oftast är djupvittrade, sprängs med ammoniumnitrit; krossas till 36 mm, mals till 0.5-0.6 mm. Den uppslammade slurryn floterar - pyrit och glimmerpartiklar tas bort - pyritavfallet behandlas och floterar en andra gång. Koncentratet håller nu 91 % kyanit; 2-5 % järnoxider och resten kvarts. Detta koncentrat avvattnas (ev också rostas) och det torra koncentratet körs genom högintensitets magnetavskiljare som minskar mängden syralösligt järn till < 1 %. Produkten kan säljas som "raw 35 mesh kyanite" men ofta mals den ytterligare till 48; 100 resp 200 mesh (0.3-0.075 mm). Den kan även kalcineras i rotationsugnar vid 1600°C - och säljas som "calcined kyanit". (Kalcinerad kaolin eller bauxit är billigare och har därför tagit över marknadsdelar).

Intressantare ur svensk synpunkt är förmodligen produktionslinjen för andalusitkoncentrat i Gomet, Frankrike. Malmen är här en svart ordovicisk skiffer med 15-20 vol-%, tändsticksstora euhedraala andalusitporfyroblaster. Malmen är vidare djupvittrad till omkring 10 m och lättkrossad. Malmen grovkrossas till ca 20 cm, mals till 100 % mindre än 0.3 mm; passerar en högintensitets magnetavskiljare (klorit+glimmer bort); den omagnetiska fraktionen går till en tung mediaseparator (sligen blandas med ferrosilikon och pumpas genom en hydrocyklon); ur sjunkprodukten avskiljs mediat. Fram till 1981 gick hälften av all andalusit förlorad i finfraktionen men utvinns numer genom flotation. Produkten är mörkbrun till svart med grovt likstora korn mellan 8-35 mesh och innehåller 59.2 % Al_2O_3 och 1 % Fe_2O_3 . En produkt med ca 53 % Al_2O_3 säljs även.

6.8 Framtida utveckling för eldfasta material

Utvecklingen för produktionen av råmaterialen, exempelvis sillmanitgruppens mineral, syntetisk mullit, har skett tillsam-

mans med utvecklingen hos eldfasta stenar och massor mot mer skräddarsydda specialprodukter. Råmaterialet för eldfast material säljs, som framgått ovan, mot bestämda specifikationer främst vad gäller kemi, täthet och kornstorlekar. Då olika råmaterial möter uppställda krav föredras alltid det med lägst energiinnehåll, med kort transportavstånd m m.

Råvaror för framställning av eldfast material efter energiinnehåll:

Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
Graphite Silica Chrome ore Zircon Andalusite	Natural magnesia Doloma Flint clay Fire clay High alumina groggs	Beneficiated natural magnesia	Sea-water magnesia Brine magnesia Mullite	Alumina Zirconia Silicon carbide .

Industrial Minerals March 1986

Grupp 1 innebär ingen (0) föregående bränning. Grupp 2 innebär bränning i ett (1) steg osv grupp 3 och 4. Grupp 5 är högenergimaterial. Material med stor elkraftstillförsel, bränning eller kemisk rening.

Det har hela tiden varit ett "tryck" från "ändleds"producenter för att nå så låga kostnader som möjligt för eldfast material, dvs kostnad för eldfasta stenar och massor per ton järn och stål. Man väljer därför olika kombinationer av eldfasta material, exempelvis material med olika egenskaper för olika delar av en masugn eller stålugn, allt för att ge bästa produkt, drift och ekonomi. Detta innebär att olika specialstenar och specialkvaliteter kommer att användas, inom branschen anses att framtiden eldfasta material kommer att ha mer gemensamt med kemiska produkter än med igenkännbara industrimineral. Användningen i specialsten m m är till klar fördel för sillimanitgruppens mineral, trots frammarsch för exempel syntetisk mullit m m, men som tidigare påpekats utan en markant förbättring inom järn- och stålindustrin kommer det ej att ske någon ökning av konsumtion för sillimanitgruppens mineral.

7. BEDÖMNING

Vid bedömningen av förutsättningarna att utnyttja sillimanit-gruppens mineral som industrimineral har endast användningen för eldfasta material och de speciella krav det ställer på råvaran beaktats.

Andra alternativa användningsområden, t ex som filltermaterial i kalkfria plattor m m har ej tagits med då mineralen härvid måste jämföras med andra, ofta billigare, fillermineral som talk, glimmer och wollastonit.

Sillimanit och andalusit förekommer i Sverige, som framgått ovan, mycket allmänt i skiffrar och gnejser, s k primärförekomster. Kyanit däremot är betydligt mer sällsynt.

I hela världen exploateras ej enbart någon primärförekomst, utan för att de skall vara ekonomiskt utvinningsbara krävs dessutom att de skall vara lättbrutna genom djupvittring och även anrikade genom vind och vatten. Dessutom poängteras att ett väsentligt villkor är tillgång till billig arbetskraft. Exempel på detta är fyndigheter i Sydafrika och Indien. Även vid det franska andalusitbrottet i Bretagne är vittring en förutsättning för brytning. Därför måste våra svenska primärförekomster betecknas ha mindre intresse. Kvar återstår därmed de relativa geologiska sällsyntheter, där olika sekundära processer (hydrotermala-, lakning-) ändrat sammansättningen mot allt mer Al_2O_3 -rika delar, en förutsättning för framför allt en rikligare andalusitbildning.

7.1 Sillimanit

Sillimanit är mycket vanligt i skiffrar och gnejser av sedimentärt ursprung, dvs i primärförekomster. I flertalet fall är säkerligen halten sillimanit i dessa för låg och i de lokaler där halten av mineralet överstiger 10 vol-% uppträder sillimaniten, av beskrivningar att döma, oftast i form av fibrolit. Fibrolit eller mineralet i finkornig, nålformig utbildning kan i dagens läge ej tillgodogöras. Som visats krävs dessutom en

djupvittring för att nå en acceptabel brytningskostnad. Någon sådan vittring av sillimanitrik bergart är ej känd i landet, men kan naturligtvis förekomma bevarad under moräntäcket. Det blir i så fall mycket slumpartat att upptäcka sådana förekomster. Användningen av sillimanit för eldfast bruk tycks även vara låg i Sverige. Med reservation för ofullständigheter i statistik förbrukas och importeras endast kyanit i landet. Några arbetsinsatser på primärförekomster av sillimanit kan därför ej rekommenderas.

Av visst intresse är då den förekomst som representeras av sillimanit-topas-felsen vid Kölaberget (se sid 23) med dess högre ingående Al_2O_3 -halter. De geologiska förhållande eller processer som lett fram till en sådan fyndighet är ej klara. Två modeller för bildningen kan urskiljas, dels anses de bildas genom kraftigare regional metamorfos av Al_2O_3 -rikare bergarter, typ bauxit-; kaolinjordar dvs bergarter med högre Al_2O_3 -innehåll än normala leriga sediment. Den andra bildningsmodellen utgår från hydrotermala processer eller omfördelning varvid bergarten fått ett relativt högre Al_2O_3 -innehåll. Pga detta är möjligheten eller förutsättningarna att hitta sådana förekomster i Sverige mycket svårbedömbara.

De kaolinvittrade partierna av urberget i Skåne skulle teoretiskt sett kunna vara omvandlade till dylika fyndigheter intill större intrusiv. Tyvärr är NV-diabaserna i Skåne äldre än vittringen (permokarbon resp tidig krita) och stundom är även diabaserna vittrade.

7.2 Andalusit

Andalusit är praktiskt taget lika allmänt förekommande som sillimanit i skiffrar, s k primärförekomster. Även för andalusit gäller vad som påpekats för sillimanit i sådana fyndigheter. Vanligen är halten för låg och även kornstorleken för liten. Vidare framgår av beskrivningar att i absoluta flertalet fall även vid grövre kornstorlek så är andalusiten mycket starkt poikilitisk eller poikiloblastisk med mikroskopiska inneslutningar av kvarts-plagioklas-glimmer (biotit)- ilmenit.

I dessa fall skulle det säkerligen krävas en långt gången dyrbar nedmalning för att därigenom nå en kvalitetsmässigt acceptabel produkt.

Av mycket större intresse ur andalusitsynpunkt är då de omvandlingsbergarter som omger sulfidförekomster i både Bergslagen och Skelleftefältet. I andalusitfelsekvenserna från Boliden och Mångfallsberget och malmkvartsiterna-andalusitkvartsiterna från Kristineberg-Viterliden-Nyborg känner vi förmodligen redan landets största koncentration av andalusit (med/eller utan cordierit). Indikationer finns dock även härifrån att andalusiten för poikilitiskt, alldeles för stor mängd, finkorniga inneslutningar (se sid 22).

I första hand rekommenderas därför att andalusitbergarterna i Skelleftefältet kontrolleras om det förekommer partier med "renare" kristallindivider och i vilken grad malning skall ske för att nå en godkänd produkt.

I andra hand föreslås mindre insatser för att konstatera om mindre "förstörda" andalusitindivider finns i Bergslagen inom de områden där grov andalusit respektive stor mängd redovisas, exempelvis Bastnäs och Glanshammar. Likaså kan en viss uppföljning utföras på de blockfynd i södra Los-området, vilka beskrivs som "renare", liksom en kontroll av området vid Norrköping (se sid 25) där uppgifter om renhet saknas.

7.3 Kyanit

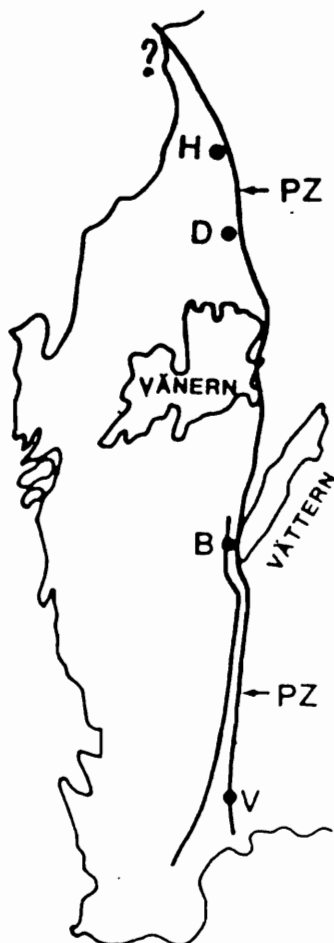
Kyanit är mer sällsynt än gruppens övriga mineral i Sverige. Mindre än ett tiotal lokaler där kyanit förekommer mer allmänt är kända.

Hålsjöberget, den enda fyndigheten som exploateras i Sverige, är att jämföra med kyanitkvartsiter i USA och Indien som förekomsttyp. Hur dessa förekomster har bildats är ej klarlagt. Två modeller för bildning kan båda vara tillämpliga. Dels kan det vara mycket Al-rika sediment som omvandlats vid regionalmetamorfos varvid aluminium kan omfördelas mer eller mindre lokalt.

Den andra modellen tillskriver hydrotermala processer en väsentlig roll, endera kan härvid aluminium tillförts, eller har de flesta elementen utom kvarts, Al_2O_3 och Ti bortförts ur bergarten.

Tidigare har för Västanaåfältet framförts åsikten att kyanit-andalusitbergarten här primärt varit en vulkanit som omvandlats i en tektonisk rörelsezon (se sid 15). I ett föredrag vid Geologiska Vintermötet 1988 framförde P.G. Andreasson och R. Stanford (Significance of deposits of Al_2SiO_5 , rare Al-phosphates and rutile along the Protogine zone, southern Sweden) att ursprunget till alla 4 kyanitförekomsterna berodde på hydrotermal aktivitet längs rörelsezoner som har samband med den sk protoginzonen.

Är det en tillfällighet att dessa fyra kyanitförekomster ligger längs protoginzonen? Geijer (1963) indikerar även en femte förekomst norr om Hålsjöberg: Genetic relationships of the paragenesis Al_2SiO_5 -lazulite-rutile. Ark.min geol. Band 3 nr 24.



I detta läge rekommenderas en fortsatt fördjupad studie över dessa fyndigheter och deras bildningssätt samt över eventuella samhöriga fosfatförekomster.

Kortfattad sammanfattning av föreslagna insatser:

- 1) Skelleftefältet. Andalusit. Kontroll om "renare" partier finns. Kan man nå en acceptabel produkt?
- 2) Mellansverige. Andalusit. Kontroll om "renare" partier finns exempelvis: Bastnäs, Glanshammar.
Uppföljning av blockfynd av renare andalusit i södra Losområdet.
Kontroll av området vid Norrköping.
- 3) Proteginzonen. Kyanit. Litteraturstudie.
- 4) Kölaberget. Sillimanit. Är sillimanit överhuvudtaget något att ta upp?

I detta sammanhang kan även ett närstående mineral tas upp, cordierit, $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$ som ofta uppträder tillsammans med andalusit och sillimanit i skiffrar och gnejser. Exempelvis tillsammans med andalusitbergarterna i Skelleftefältet förekommer rikligt med cordierit. Man behöver endst nämna avfallet från brytningen i Adak som innehåller stora mängder cordierit. En efterfrågan på mineralet har under senare tid, enligt uppgift, tillkommit för användning i s k cordierit-keramer, förutom den tidigare i keramik och vissa eldfasta material.

Som ett första steg för att se om cordieriten i Adak kan bli en "produkt" föreslås därför en kontroll av kornstorlek, "renhet", kemi m m hos cordieriten i avfallslagret efter brytningen i Adak.

8. LITTERATURLISTA

SOU 1977:75 Industrimineral.

Harben, P.W. - Bates, R.L., 1984: Geology of the nonmetallics.
Metal Bull. Inc.

Kuzvart, M., 1984: Industrial minerals and rocks. Elsevier.

AIME, 1983: Industrial Minerals and Rocks.

SGU: Länsbeskrivningar, Kartbladsbeskrivningar samt Rapporter
och meddelanden.

Tidskrifter: Ex Mining annual review. Industrial Minerals.
Mining Journal.

Ekström, M., 1985: Mikroskopisk undersökning av Rågods och
Anrikningsprodukter från andalusit-sillimanitmine-
ralisering. SGAB PRAP 85076.