

Kryolitforekomsten i Ivittuut (Ivigut) - opbygning og dannelse

John Bailey



Kryolitforekomsten i Ivittuut (Ivigut) i Sydgrønland er enestående - den var verdens største koncentration af mineralet kryolit og den eneste brydeværdige. Den farveløse eller snehvide kryolit har navn efter det græske 'kryos' - is og 'lithos' - sten, altså is-sten (box A). Mineralet er i kemisk henseende et Natrium-Aluminium-Fluorid, med formlen Na_3AlF_6 .

Kryolitkrystaller. Foto: O. Medenbach.

Den økonomiske betydning skyldes anvendelsen af kryolit som flusmiddel i den såkaldte Hall-Héroult proces, ved hvilken der fremstilles metallisk aluminium ud fra aluminiummalmen bauxit (se VARV 1997,4). Uden kryolitforekomsten i Ivittuut ville aluminiumproduktionen og dermed f.eks. væksten i flyvemaskineindustrien have set anderledes ud.

Kryolitforekomsten i Ivittuut på sydkysten af Ilorput (Arsuk Fjorden) i Sydvestgrønland (61°12'N, 48°11'V, figur 1) blev i 1806 forevist mineralsøgeren Carl Giesecke af grønlændere. Carl Giesecke var på det tidspunkt på mineralogisk opdagelsesrejse for den danske regering (om udforskning og udnyttelse af kryolit se artiklen side 49).

Forekomsten findes i toppen af et granitlegeme, Ivittuut graniten, der tilhører Gardar provinsen i Sydvestgrønland (se side 4). Graniten ligger i Gardar provinsens nordvestlige randområde.

Provinser er præget af opstigningen af enorme rumfang af magma, der dels strømmede ud på overfladen som lavastrømme og dels afkøledes

langsomt i dybet enten som sprækkeudfyldninger (gange) eller som store magmatiske legemer (plutoner). Den magmatiske aktivitet i Gardar provinsen fandt sted for mellem 1.350 og 1.120 millioner år siden og Ivittuut graniten har givet en alder på 1.171 +/- 10 millioner år og var den yngste magmatiske begivenhed i Ivittuut området.

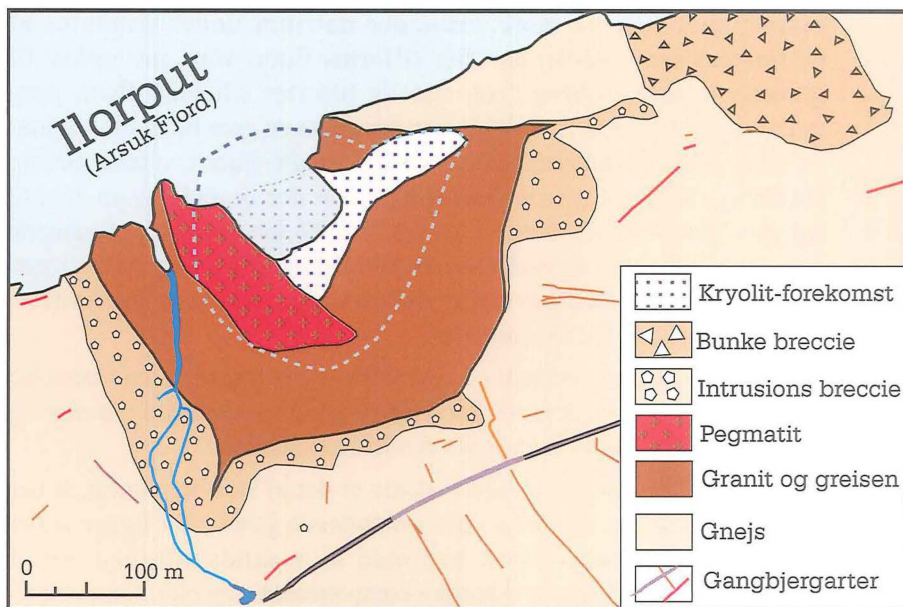
Ivittuut graniten

En tidlig geologisk aktivitet i Ivittuut området omfatter en eksplosiv breccie ('Bunke breccien'), der dannedes ved, at små og store skarp-kantede brudstykker af ældre - eksisterende - bjergarter fra Ivittuut blev kittet sammen af nedknust materiale af samme sammensætning (figur 1). Efter brecciedannelsen blev området gennemsat af nogle få yngre gange af forskelligartet materiale. To af disse gange indeholder små mængder kryolit, som et første fingerpeg om fremtidige usædvanlige mineraler. Derefter dannedes atter en breccie, hvis blokke og fragmenter ligger i en fuldstændig opsmeltet matrix af samme materiale som blokkene. Endelig pressede et større granitisk magma sig op gennem den yngste breccie og størknede som Ivittuut graniten.

Ivittuut graniten har form som et rør, der er 300 meter i tværsnit. Boringer i 1950'erne viste, at røret fortsætter ned til mindst 560 meters dybde, og boringer i 1980'erne, som skar den nordøstlige side af røret i 800 meters dybde, afslørede, at det udvider sig i denne retning. Det smalle rør er tolket som en udløber fra et meget større og dybereliggende granitisk legeme.

Den friske Ivittuut granit er mørkegrå. Hvor den blev hurtigt afkølet - op imod taget af røret - indeholder den større strøkorn - i en finkornet grundmasse - af alkalifeldspaten mikroklin samt kvarts. Udover mikroklin og kvarts findes biotit, en jernrig olivin, amfibol og - i meget små mængder - zirkon, magnetit, ilmenit, fluorit og siderit (se box B). En sammenligning af granitens kemiske sammensætning med eksperimentelt dannede granitsmelter viser, at graniten størknede ved en temperatur på ca. 700°C i en dybde på 3 km.

Den yngste del af graniten var et pegmatitisk legeme på 170 x 60 x 6 meter. Det meste af pegmatiten bestod af mikroklin og op til 50 cm store



Figur 1. Geologisk kort over kryolitiforekomsten ved Ivittuut. Den lyse- og mørkeblå stiplede linie viser den underjordiske udbredelse af kryolitiforekomsten.

mælkehvide kvartskrystaller. Spredt fandtes smukt facetterede krystaller af mineralet columbit samt små mængder cassiterit og biotit. I pegmatiten blev der også fundet en spændende krystalhule med en størrelse på 1,5-2 meter i tværsnit. Her fandtes foruden kvarts, fluorit, siderit, glimmermineralet phengit (phengit kaldes ofte i Ivittuut for 'ivigitit'), arsenopyrit og aluminiumfluoridmineralet weberit. I dag findes kun en lille del bevaret på bruddets vestvæg.

Ivittuut granitens senere historie

Efter Ivittuut granitens størkning blev der frigivet opløsninger fra det dybereliggende granitiske legeme. Disse opløsninger steg op gennem røret og koncentreredes i toppen. Herved blev de oprindelige mineraler i toppen af røret (taggraniten) - bl.a. feldspat, amfibol og biotit - opløst, og den oprindelige grå granit omdannedes til en lyserød granit. Senere

opløsninger tilførte store mængder natrium under dannelse af natriumfeldspat (albit), derefter tilførtes fluor, som gav ophav til glimmermineralet phengit, og endelig tilførtes silicium, fluor, jern, zirkonium, tin, zink og svovl. Herved dannedes en grøn bjergart - greisen - med nydannede mineraler som kvarts, phengit, fluorit, siderit, zircon, columbit, cassiterit og sphalerit. Lokalt var der områder, som strakte sig over flere 10-tals meter, med op til 30% kryolit. De omdannede granitiske bjergarter optræder som mere eller mindre koncentriske zoner omkring den senere kryolitforekomst med stigende intensitet i omdannelser ind mod forekomsten.

De yngste bjergarter i Ivittuut - inden selve kryolitforekomstens dannelse - er kvartsårer, der skærer de forskellige typer omdannede graniter og greisen, men som selv skæres af kryolitforekomsten.

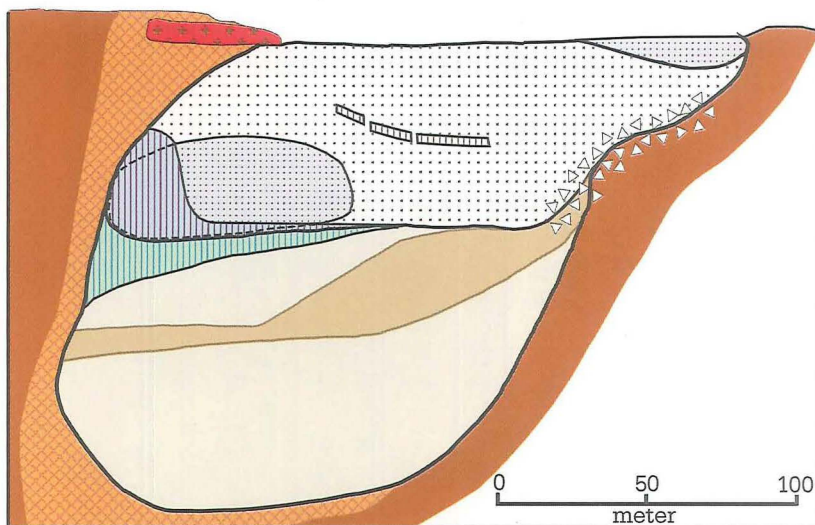
I tolkningen af den geologiske historie er det af stor betydning, at der stort set ingen kryolit findes i den omdannede granit, der ligger under kryolitforekomsten. Røret har med stor sandsynlighed været tilførselskanal for de mange kemiske komponenter, som blev koncentreret i greisen og i den senere dannede kryolitforekomst. Der er mange spor af kvarts, phengit og andre karakteristiske mineraler, men ikke af kryolit. Et af de store spørgsmål omkring kryolitforekomstens geologiske historie har derfor naturligt været: Hvorledes kunne så enorme mængder kryolit - mere end to millioner tons - dannes i taget af granitrøret, uden at der er væsentlige spor af kryolitkomponenterne i den eneste tilførselskanal, nemlig røret, som førte op til denne tagzone?


Under det detaljerede felt- og borearbejde, der har været udført i Ivittuut, er det ikke lykkedes at finde nogen anden tilførselskanal, hvorigennem kryolitkomponenterne kunne have passeret.

Kryolitforekomsten

Den yngste begivenhed i Ivittuut var dannelsen af selve kryolitforekomsten. Den var placeret i toppen af Ivittuut graniten lige under det store pegmatitlegeme.

Forekomsten havde skarpe kontakter til de omgivende bjergarter, d.v.s. hovedsageligt de forskellige typer af omdannet granit, og er derfor klart

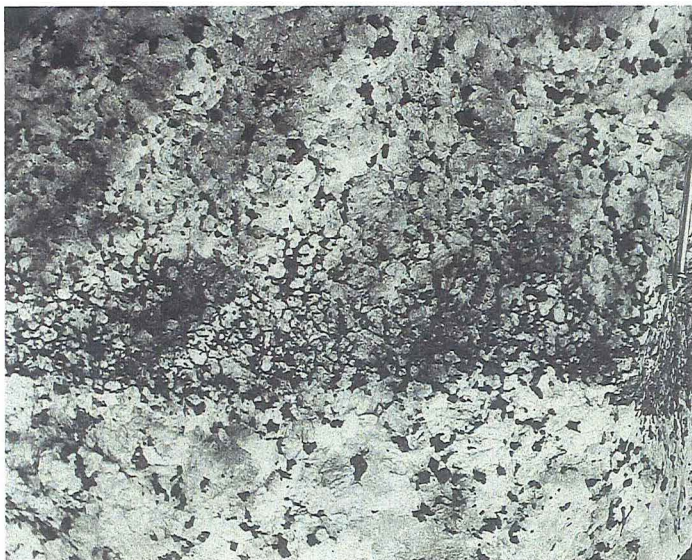


- | | |
|--|--|
|  Fluorit-topaz |  Siderit-kvarts med siderit-rige bånd |
|  Fluorit-kryolit |  Breccie |
|  Ren kryolit |  Greisen |
|  Siderit-kryolit |  Pegmatit |
|  Sort kryolit med rødbrun fluorit |  Granit |

Figur 2. Øst-vest snit gennem kryolitforekomsten. Den oprindelige udstrækning af den rene kryolitenhed er angivet ved en punkteret linie.

ynge. Der var således en slående kontrast mellem de lyserøde og grønne omdannede graniter med deres millimeterstore 'små' mineralkorn og kryolitforekomsten med dens snehvide kryolitmineralkorn på mellem 1 og 10 cm.

Kryolitforekomsten var sammensat af flere enheder, som adskilte sig fra hinanden i mineralogisk sammensætning (tabel 1, figur 2). Den øvre del af forekomsten havde form som en kuppel med en største højde på ca. 70 meter og nåede lige akkurat op i havniveau. I vandret plan var den oval med en maksimal størrelse i øst-vestlig retning på 140 meter, mens



Figur 3. Båndet siderit-kryolit, som viser netagtig struktur. Målestokken er 10 cm lang.

den i nord-sydlig retning var 170 meter. Fra kuplens grundflade hævede en østlig udløber sig til 5 meter over havniveau. Denne udløber og den mellemliggende tærskel til hovedforekomsten rummer et antal specielle træk, som vil blive omtalt nedenfor. Kuppel og udløber minder i form om en skildpadde (se billedet heraf på bagsiden).

Hovedparten af kuplen og den østlige udløber bestod af såkaldt siderit-kryolit. Svøbt omkring dens vestlige og nedre del fandt man fluorit-kryolit, som hvilede på en kryolitfri enhed domineret af mineralerne fluorit og topas. Mellem fluorit-kryoliten og siderit-kryoliten forekom et legeme af ren hvid kryolit.

Den resterende del af forekomsten ligger under disse fire enheder og er ikke brudt. Diamantboringer afslørede tilstedeværelsen af et kryolitfrit siderit-kvarts legeme, der strækker sig ned til en dybde af 150 meter under havniveau.

Tabel 1.

Mineralsammensætningen - i vægt% - af de enheder, der opbygger kryolitforekomsten. Omdannelsesprodukter af kryolit (thomsenolit, pachnolit, ralstonit og gearksutit) er udeladt.

	siderit- kryolit	ren kryolit	fluorit- kryolit	fluorit- topas	siderit- kvarts	total
kryolit	71,9	98,0	70,0	-	-	20,3
chiolit	spor	2,0	8,0	-	-	0,4
siderit	19,2	-	-	-	21,0	8,1
sulfider	1,9	-	spor	spor	3,0	2,4
kvarts	7,0	-	-	-	73,0	51,8
fluorit	spor	-	12,2	56,7	-	2,8
topas	-	-	4,5	30,1	-	1,4
'ivigit'	-	-	2,9	7,1	3,0	2,5
weberit-jarlit	-	-	2,4	6,1	-	0,3
sum	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
mio tons	2,3	0,5	0,5	0,5	8,5	12,3

'Ivigit': lokalt navn for en finkornet lys glimmer af phengitisk sammensætning.

Kryolitforekomstens enheder

I størstedelen af **siderit-kryoliten** var mineralerne arrangeret i veldefinerede bånd med en tykkelse på ca. 1 meter. Figur 3 viser et sådant bånd bestående af ren kryolit øverst med stigende mængde mørk siderit nedefter. I dag, hvor kryoliten er sprængt væk, kan man ikke længere se disse bånd i naturen, men på gamle fotografier kan man tælle op, at der har været 30 bånd ialt. I gamle optegnelser er det bemærket, at båndene fulgte kuplens øvre overflade, d.v.s. kontakten til den omgivende greisen,

og at de også var parallelle med den rene kryolitenhed, som de omslutter. Overalt i den bandede siderit-kryolit optrådte siderit som mm- til cm-store aggregater, som dannede et tredimensionelt netværk mellem afrundede masser af kryolit. Maskerne i netværket kan være op til flere cm i tværmål.

I 1889 blev der blotlagt en højst usædvanlig varietet af siderit-kryoliten. Den indeholdt cm-store krystaller af rødbrun fluorit (figur 4). Den omgivende kryolit var røg- eller sortfarvet. Da man nogle årtier senere fik kendskab til radioaktive grundstoffer, kunne man henhøre de usædvanlige farver til et indhold af det radioaktive grundstof thorium på 0,3%. Mængden af denne varietet af siderit-kryolit har kun været omkring 10-20 tusind tons.



Figur 4

Indenfor den østlige udløber var siderit-kryoliten særlig rig på siderit. En veldefineret bue på ca. 6 x 4 meter var her sammensat af store sideritkrystaller i blomkålsform anbragt rundt om et område af siderit-kryolit. Denne bue kan sammenlignes med et biologisk rev, og man må forestille sig, at en sådan sart revlignende masse af krystaller er dannet under ekstremt rolige forhold.

I siderit-kryoliten varierede kryolitindholdet betragteligt. Ved den østlige udløber i tærskelens sideritrige materiale var der kun 10-20% kryolit. Hovedmassen af enheden indeholdt imidlertid omkring 70% kryolit, og mod vest, hvor den nærmede sig den rene kryolitenhed, steg indholdet til 80-90%.

De vigtigste sulfider i siderit-kryoliten var sphalerit, chalkopyrit, galena og pyrit, og disse optrådte altid i forbindelse med siderit. Som et biprodukt ved raffineringen af kryolit i København separerede man i årene 1937-1964 omkring 500 tons blyglans med et sølvindhold på 0,48-0,91% og

et bismuthindhold på 0,80-1,66%.

På grundlag af undersøgelser af krystalformen hos kvarts i siderit-kryolit har man vist, at krystallisationstemperaturen var 600°C. Studier af sulfidminerale og gas-væskeindeslutninger (se artiklen side 12) peger på temperaturer omkring 550°C. Man har derfor konkluderet, at krystallisationstemperaturen lå i intervallet 550 - 600°C.

Den **rene kryolit enhed** fandtes som et aflangt legeme, der strakte sig 150 meter gennem forekomsten i sydvest-nordøstlig retning. Enkelte krystaller af kryolit var op til 6 meter lange. I enheden forekom to andre sjældne aluminiumfluorider - kryolithionit og chiolit - i krystaller op til dm-størrelse.

Da **fluorit-kryoliten** under brydningen blev blotlagt nedenunder den rene kryolit, blev den straks erkendt som en breccie. Op til kryolitenheden kunne breccieringen kun iagttages som revner i kryoliten, men længere væk fra overgangen var revner og sprækker fyldt med en ekstremt finkornet topas og med lommer af fluorit (figur 5).



Figur 5. Fluorit-kryolit. En breccie af lysegrå kryolit cementeret af topas.

De større årer af topas viste gentagen brecciering. På dybere niveau i **fluorit-topas enheden** kunne disse træk stadig iagttages, men man fandt

ikke kryolit (figur 6). Spredt i disse to fluoritførende enheder var der årede ansamlinger af mikrokrystallinsk 'ivigitit' og velkrystalliseret weberit foruden andre sjældne mineraler.

Under de enheder, der indeholder kryolit og andre fluormineraller, ligger som nævnt **siderit-kvarts enheden**. Dens gennemsnitlige tykkelse er 85 meter. Sideritmængden er beregnet på grundlag af 944 meter borekerner og danner grundlag for en opdeling i 3 underenheder, hvis indhold af siderit med stigende dybde er <10%, 10-20% og 40-90%. Den midterste underenhed synes at danne en plade, der hælder mod nord og vest. Den er tykkere og har et større indhold af siderit i retning mod bunden af den østlige udløber. Overalt i denne enhed optræder kvarts i krystalaggregater, hvor de enkelte krystaller er 3-5 cm lange og 0,5-0,7 cm brede, ofte med hulrum mellem krystallerne. Siderit-kvarts enheden viser ofte spaltestykker af siderit omgivet og overvokset med kvarts (figur 7).



Figur 6. Fluorit-topas med kolloidalt udfældet fluorit (violet). Denne er breccieret gentagne gange og cementseret af topas.



Figur 7. Siderit-kvarts med spaltestykker af siderit (brunt).

Kryolitforekomstens geologiske udvikling

Den geologiske udvikling kan inddeles i tre stadier. Det første stadium rummer 11,3 af kryolitforekomstens ialt 12,3 millioner tons.

1. stadium: Den østlige udløber af siderit-kryoliten viser træk, der peger på, at dannelsen er sket med stor voldsomhed, da dens grænser er opbygget af en breccie. Samme forhold ses i den underliggende tærskel, der forbinder udløberen med hovedforekomsten. I brecciedannelsens tidligste stadier faldt flager af den granitiske sidesten ind i den tilgrænsende siderit-kryolit (figur 8). Disse skarpkantede flager, som minder om flagerne fra spontane stens kud, der lejlighedsvis optræder i uunderstøttede og uafskærmede minegange som følge af trykaflastning, kom antagelig fra taget over kryolitforekomsten.

Et interessant træk er, at både flagerne og løssprængte blokke af sidestenen kun bevægede sig lidt væk fra væggene og blev spredt temmelig jævnt i den tilgrænsende siderit-kryolit. Dette tyder på, at siderit-kryoliten var temmelig sejtflydende, et træk som antagelig var afhængigt af den smidige eller plastiske karakter, som kryolit udviser ved 550°C og ved et forholdsvis lavt tryk (1 kilobar, se box A).

Hist og her i den østlige udløber forekom spredte krystaller eller lokale koncentrationer af kvarts. F.eks. voksede der ofte små kvartskrystaller



Figur 8. Breccie fra den østligste del af kryolitlegemet.

på flager af sidestenen, hvorfra de 'skød' sig ind i den omgivende kryolit (figur 9). Sådanne observationer viser, at på dette tidspunkt var de tre hovedmineraller i forekomsten - kryolit, siderit og kvarts - allerede tilstede. Komponenterne til disse mineraller ankom ikke i en række af opløsninger, den ene efter den anden, de var der allerede og var antagelig godt blandede i en sejtflydende masse.

Dannelsen af siderit-kryolit i den østlige udløber kan have været temmelig voldsom med dannelsen af en breccie. Velformede krystaller af siderit med velbevarede krystalflader var sjældne. Måske blev sådanne krystaller slået mod hinanden under den tidlige bevægelse i siderit-kryoliten eller under den voldsomme indtrængning i den østlige udløber. I modsætning hertil viste kryolit med sin plastiske opførsel ingen fragmentering under dette tidlige højtemperaturstadium af forekomstens dannelse.

Skønt dannelsen af den østlige udløber var den første begivenhed, der kunne iagttages i kryolitforekomsten, var der dog muligvis en endnu ældre, nemlig dannelsen af den sorte kryolit med rødbrun fluorit midt i siderit-kryoliten. Strukturen i dette materiale antyder, at de velformede fluoritkrystaller dannedes først. Fluoriten blev derefter overvokset med hvide kvartskrystaller og indgik i aggregater af siderit, sulfider og sort kryolit, der udfyldte de tiloversblevne mellemrum (figur 6). Denne tidligt dannede fluorit synes at have været særlig effektiv til at opsamle hovedparten af grundstoffet thorium og de sjældne jordartsmetaller, der var til stede i forekomsten.

Siderit-kryolit enheden er karakteriseret ved bånd- og netværksstrukturer. Så vidt vi ved, er tilsvarende strukturer aldrig tidligere observeret i en større brydeværdig mineralforekomst. Bånding udvikles almindeligt i bjergarter dannet i magmakamre, men om tilsvarende processer fandt sted i siderit-kryoliten er ikke klart.

I stedet har det været foreslået, at siderit-kryolitens materiale var i stand til at flyde som is i en gletscher eller som salt i en saltstruktur. Denne tolkning er baseret på kryolitens evne til at lade sig deformere, som er sammenlignelig med stensalts. Bliver en saltbjergart påvirket af tektoniske bevægelser, kommer det ikke til brud, men til bøjning af lagene, således at den oprindelige lagdeling bevares trods store bevægelser. Saltbjergarter flyder endvidere ofte i forbindelse med ydre påvirkninger. Måske var blandinger af siderit og kryolit i stand til at flyde på et mere mobilt stadium. Ved høje temperaturer - nær smeltepunktet - bliver kryolit plastisk, udvider sig kraftigt og taber samtidig i vægtfylde. Det har været postuleret, at sideriten koncentreredes langs de mest intensive glideplaner, der derefter fremtrådte som bånd i enheden. Om denne tolkning holder, er langt fra klart. Flydning kan også være grunden til, at siderit stort set overalt er brudt i stykker.



Figur 9. Greisen i kryolitforekomsten. Greisen (nederst) er overvokset med kvartskrystaller, som 'skyder' sig ind i kryolit.

En mekanisk flydemodel og den tidlige forekomst af plastisk kryolit kan forklare manglen på kemisk variation indenfor siderit-kryoliten. Alle de mineraler, der er undersøgt, viser kemisk ensartethed, selv de små mængder af sølv- og bismuthholdig galena.

Det er også muligt at tolke netværksstrukturen på baggrund af kryolitens evne til at lade sig deformere. De kryolitfyldte blærerum i sideriten ligesom dennes hyppigt afrundede overflader peger i retning af, at siderit krystalliserede op mod en plastisk kryolitmasse. Den plastiske kryolit ville udvide sig ved opvarmning og ved denne proces klemme sig ind i enhver hulhed i siderit-kryoliten, hvilket forklarer fraværet af tomme hulrum.

Siderit-kvarts enheden i de nederste to trediedele af forekomsten kan også tilskrives 1. stadium. De sideritrige bjergarter på tærsklen til den østlige udløber går jævnt over i siderit-kryoliten ovenover og siderit-kvarts enheden nedenunder. De samme itubrudte sideritkrystaller og de samme sulfider findes både ovenover og nedenunder. Der er ikke noget, der tyder på, at siderit-kryoliten krystalliserede før siderit-kvarts enheden eller omvendt. Dette peger i retning af, at den grundlæggende opsplitning af forekomsten i en fluorholdig enhed øverst og en silikatholdig enhed nederst allerede var etableret forud for 1. stadiums begivenheder (mere herom senere).

2. stadium er repræsenteret ved fluorit-kryolit og fluorit-topas enhederne i den vestlige del af forekomsten, og disse enheder beløber sig til ialt 1 million tons. På dette tidspunkt dannedes et stort væskefyldt hulrum, der indeholdt de grundstoffer, der var tilbage efter dannelsen af de første mineraler (calcium, fluor og aluminium, noget silicium, magnesium, kalium og lidt strontium og barium). Hurtig afkøling i forbindelse med gasekspllosioner indførte ekstremt finkornet (kryptokrystallinsk) topas i breccier, og der udfældedes nyreformig fluorit. Disse to mineraler udgør fluorit-topas enheden. Øverst oppe faldt en del af kryolittaget ned i det store hulrum, og topas-årede brudstykker af kryolit blandet med fluorit gav opkomst til fluorit-kryolit enheden.

Sammensætningen af de opløsninger, der på det tidspunkt indgik i dannelsen af kryolitforekomsten, ændredes drastisk mod slutningen af 2. stadium, og i små lommer på tilsammen tusinder af tons udkrystal-

liseredes vandholdige mineralselskaber rige på grundstofferne magnesium (weberit), kalium ('ivigitit'-glimmer), strontium og barium (jarlit, baryt, bøgvadit, jørgensenit og acuminit).

De eksplosivt udløste gasarter var også årsag til dannelsen af to breccie-skorstene. Den skorsten, der var blottet i bruddets sydvæg, havde form som en omvendt tragt med en åbning på ca. 50 x 30 meter og smalnedede til opefter med en højde på mindst 65 meter. Den nederste del af breccien brød igennem den bandede siderit-kryolit. Derefter flød kryoliten plastisk ind mellem brecciens fragmenter og dannede årer. Kryoliten så ud til at være mast igennem et meter-stort rør langs med breccien og have dannet en ren kryolitlomme 15-20 meter over forekomsten.

En lignende breccie-skorsten optrådte i bruddets nordvest-væg og var udformet i fluorit-kryolit enheden. Kryolitfyldte sprækker forbandt de to breccier, hvilket viser, at de blev dannet samtidig og efter fluorit-kryolit enheden.

3. stadium begyndte, efter at fluorit-kryoliten var konsolideret. Det beløber sig til beskedne 80.000 tons. Vanddampe opkonstreredes i lommer i den ydre vestlige del af forekomsten og undslap langs mere end 20 lodrette sprækker. I disse sprækker foregik der nogen rekrySTALLISATION af kryolit, og der dannedes lejlighedsvis nye kryolitkrystaller. Nogle hulrum med calcium-ioner reagerede med kryoliten i hulrumsvæggen under dannelsen af krystaller af mineralerne thomsenolit, pachnolit og gearksutit, medens magnesium-ioner på tilsvarende måde reagerede med eksisterende mineraler og dannede mineralet ralstonit. Opløsninger i dette sene stadium må have været vandrige og kuldioxidfattige.

Under udviklingen af kryolitforekomsten fra 1. til 3. stadium er der to træk, der er værd at understrege. For det første var der gentagne gange spredte og ofte voldsomme udbrud af gasser i og omkring forekomsten. Dette er naturligvis ikke overraskende, den høje koncentration af komponenter som vand og kuldioxid taget i betragtning. For det andet blev resultatet - i det konkurrenceforhold som kryolit altid står i overfor det mere almindelige fluormineral fluorit - en overvældende sejr for kryolit. Således var fluorit tidligt i udviklingsforløbet kun til stede i ubetydelig mængde som rødbrun fluorit sammen med sort kryolit og var

næsten fraværende under 90% af forekomstens historie.

Efter at have skitseret opbygningen og udviklingen af kryolitforekomsten kan vi nu betragte nøglefaktorerne i dens dannelse. Men først vil det dog være nyttigt at omtale nogle af de knap en snes andre kryolitlokaliteter i verden. Kryolit kendes ud over fra Ivittuut i mindre mængder fra granitpegmatiter og omdannede graniter fra 17 andre steder i verden.

Andre kryolitlokaliteter

Granitiske pegmatiter med deres store krystaller har altid haft mineralogers interesse. I 1845 blev der ved Minsk i Ilmenbjergene i Rusland brudt en topas-førende pegmatit, hvor 1,1 meter store hulrum var fyldt med kryolithionit og kryolit delvis omdannet til mineralet chiolit. I St. Peters Dome distriktet i Colorado optræder kryolit i tre alkaligranitpegmatiter og i adskillige kvarts-mikroklin årer. I Volyn kammerpegmatiterne i Ukraine findes mikroskopiske krystaller af kryolit i fluidindeslutninger og som faste indeslutninger i topas og kvarts fra omdannelseszoner i pegmatiter.

Ved Gjerdingen i Norge finder man kryolit sammen med andre aluminiumfluorider i hulrum i en natriumrig granit. I den natrium-omdannede (albitiserede) Kafføgranit i Nigeria er der mere end 2% kryolit i zoner på 1-10 meter. I tilsvarende albitiserede graniter fra Tarbagatay i Kazakhstan optræder kryolit jævnt spredt samt i reder på op til 30 cm i tværmål, der udelukkende består af kryolit. Erzinintrusionen på Tuva i Centralasien indeholder en tilsvarende granit med op til 5-8% kryolit og thomsenolit. I Ukraine har Perga graniten spredte korn og årer af kryolit; her blev albitiseringen og greiseniseringen fulgt af en intens fluorpåvirkning. Graniter fra Pitinga Minen i Nordvestbrasilien har smalle zoner, der er rige på kryolit. Der findes udover de nævnte 9 yderligere 8 kryolitlokaliteter i verden.

Fællestræk ved disse lokaliteter kan danne baggrund for vurderingen af, hvordan sådanne forekomster dannes, og dermed måske også danne baggrund for at finde nye forekomster.

Hvordan dannes kryolitforekomster

Kryolit forekommer ofte i intrusioner knyttet til magmatisk aktivitet i et forkastningsmiljø.

Intrusionerne indeholder ofte de natriumrige amfibolminerale riebeckit og/eller arfvedsonit. Størst interesse vil knytte sig til sene små intrusioner, hvori der er foregået en omdannelse ved en forholdsvis høj temperatur ved hjælp af gennemsvivende opløsninger, d.v.s. albitisering og greisenisering. Vigtige ledemineraler vil bl.a. være fluorminerale topas og fluorit.

Spørgsmålet er nu: Hvorledes dannes en kryolitforekomst? Kryolit er helt klart knyttet til natriumrige graniter, der ofte er de sidste små intrusioner indenfor en serie af større granitintrusioner. Det betyder, at sjældne grundstoffer som fluor, der ikke indgik i mineraler dannet under den tidligste krystallisation, blev koncentreret i restsmelten, hvorfra de 'sidste magmadråber' blev dannet. Graniterne og de tilknyttede pegmatiter trængte højt op i skorpen, hvor de fluorholdige opløsninger i bjergarterne forsvandt på grund af de lave tryk.

Fluor har endvidere en evne til at opkoncentreres i smelter, hvis passende lokale omstændigheder findes. F.eks. kan fluor opløses i en granitisk smelte, eller det kan reagere med mineralerne i et allerede eksisterende granitisk legeme under greisendannelse (se ovenfor). Fra eksperimentelle undersøgelser ved man, at et granitisk magma kan opløse flere procent fluor. Imidlertid udkrystalliserer fluorrige graniter i naturen ikke kryolit, men danner topas, fluorrig glimmer og/eller fluorit. De samme undersøgelser viser, at opløsninger og dampe i ligevægt med en fluorrig granit også er fluorrige og, hvad der er aktuelt i denne forbindelse, også udfælder kryolit ved afkøling. I disse tilfælde viser de eksperimentelle undersøgelser og naturen overensstemmelse, eftersom kryolit dannes enten i graniter omdannet af højtemperatur opløsninger, i årer og hulrum af opløsninger udskilt fra graniter, eller i områder hvor der findes en stor koncentration af de tilknyttede pegmatiter.

I ovenstående er der fokuseret på sammenhængen mellem granit og kryolit. Men det er vigtigt at understrege, at det meste af den fluor, der findes i graniter eller undslipper fra granitiske smelter, når temperaturen falder, aldrig vil frembringe kryolit. I box C er den geokemiske

sammenhæng mellem fluor i graniter og de tilknyttede opløsninger opsummeret. Det fremgår, at kryolit er meget sjældent sammenlignet med andre fluor-mineraler som f.eks fluorit og fluorrig glimmer. På de ovenfor nævnte kryolitlokaliteter optræder kryolit i mængder fra milligram til kilogram. Kun i Ivittuut har der været tale om millioner af tons kryolit. Det er klart, at vi derfor må søge efter yderligere dannelsesmekanismer for at forklare kryolitforekomsten i Ivittuut.

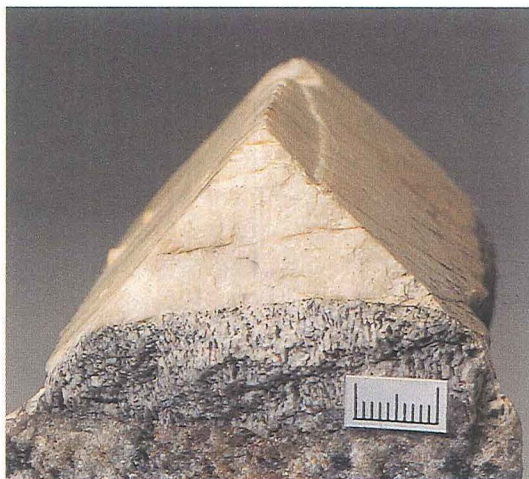
Det er en udbredt misforståelse, at kryolitforekomsten er knyttet til de pegmatitiske bjergarter. De første besøgende i Ivittuut blev slået af det store område med granitisk pegmatit, der ligger umiddelbart over kryolitforekomsten. Det fik dem til at foreslå, at forekomsten - ligesom i Miask, St. Peters Dome og Volyn - skulle være en del af en pegmatitisk udvikling. I forhold til hele kryolitforekomsten er de forskellige pegmatiter i Ivittuut graniten vægtmæssigt ubetydelige, ligesom der aldrig er pegmatitisk materiale langs kryolitforekomstens kontakter. Ydermere er hovedpegmatiten betydelig ældre end kryoliten. Der var endvidere en lang periode, i hvilken Ivittuut graniten og det pegmatitiske materiale blev omdannet af opløsninger, som steg op gennem granitrøret, og endelig var der en generation af kvartsgange før kryolitforekomstens dannelse. Selve forekomsten målte som nævnt 170 x 140 meter i vandret plan og var op til 155 meter tyk - en bemærkelsesværdig størrelse. Mineraliserede legemer, der er knyttet til graniter - herunder pegmatiter - er almindeligvis betydelig mindre. Således er kvartslegemet ved Panasqueira i Portugal kun 50 x 20 meter i tværmål, og kvartslegemet ved Sadisdorf i Erzgebirge i Tyskland ikke mere end 20 meter tykt. Molybdænforekomsten ved Climax i Colorado udbreder sig over 1.000 meter, men der er ingen store veldefinerede legemer, kun utallige spredte små årer.

Sprækker og forkastninger udvikles i forbindelse med trykpåvirkninger af faste bjergarter. Trykpåvirkningen kan lokalt hidrøre fra det tryk, som gasserne fra en restsmelte udøver. Trænger der efterfølgende smelter ind i sprækkerne, dannes der gangbjergarter. Sådanne gange vil ofte have en bredde fra få cm til få meter. Kun sjældent bliver de så store som kryolitforekomsten. Et af de spørgsmål, forskere der har arbejdet i Ivittuut har stillet sig, er: Hvordan skabes der plads til den enorme kryolitforekomst?

Udover disse rumlige betragtninger er der ligeledes foretaget en vurdering af grunden til den ekstraordinært høje koncentration af fluor i forekomsten - 13,1%. Granitisk materiale indeholder normalt mindre end 1% fluor. Den greisen, der findes i Ivittuut, har derimod en høj koncentration af fluor - mere end 5%, og det er nærliggende på en eller anden måde at knytte kryolitforekomsten sammen med denne fluorrige greisen, som omgiver det meste af forekomsten. I Ivittuut optræder ialt to usædvanlige typer af greisen, hvori der er gjort observationer, der styrker denne ide. Den første type findes lige over den vestlige del af forekomsten. I denne greisen ses nogle finkornede meter-store områder med omkring 14% fluor. De består hovedsagelig af kryolit, kvarts og siderit (figur 10), d.v.s. præcis de tre hovedmineraller i kryolitforekomsten. Disse områder omgiver dm-store blokke af mikroklin, som langs grænserne er erstattet af kryolit (figur 11). I mikroskopet viser områderne karakteristika, der peger på højtemperaturomdannelser, men der er ingen tegn på bånding med netværksstruktur eller den meget grove kornstørrelse, der kendes fra den egentlige kryolitforekomst.



Figur 10. Fluorrig greisen bestående af sort kryolit, kvarts og siderit, som omgiver en mikroklinblok (nederst til venstre)



*Figur 11. Stor Mikro-
klinkrystal, hvis ydre del
(nederst) er under om-
dannelse til sort kryolit*

Den anden type greisen indeholder 10-30% sort kryolit, hvilket svarer til mellem 5 og 15% fluor, og strækker sig over flere 10-tals meter. De sorte pletter af kryolit samler sig lokalt til klumper på 1-2 cm. Lejlighedsvis findes der kryolitårer med bølget, båndlignende form og diffuse grænser (figur 13). Dette tyder på, at større samlinger af kryolit var begyndt at vise sig i den omgivende greisen og var i stand til at bevæge sig gennem denne, som var i en plastisk form. Er det, vi ser, begyndelsen på en opsmeltning af greisen? Er det muligt at forvandle millioner af tons af fluorrig fast greisen til en plastisk - flydende masse?



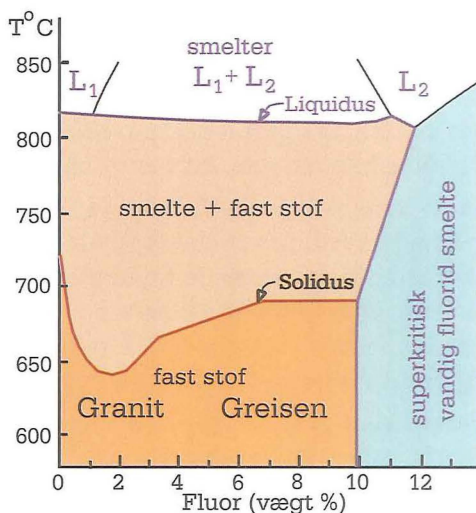
Figur 12. Uregelmæssige årer af sort kryolit i grøn greisen

Et forsøg på en forklaring af kryolittforekomstens dannelse

'Omdannelsen' af en fluorrig fast bjergart til en fluorrig væske kan belyses ved oplysninger fra eksperimentelle undersøgelser (figur 13). Ved et tryk på 1 kilobar svarende til omkring 3 km's dybde i jordskorpen (en sandsynlig dybde for Ivittuut bjergarterne) har tilsætningen af fluor i form af flussyre (HF) til en vandholdig granitisk smelte en række interessante virkninger: I begyndelsen reduceres smeltens størknings-temperatur betydeligt, nemlig fra 760°C for 0% fluor til 640°C for 1,6% fluor. Yderligere vil tilsætning af fluor til en fast granitisk bjergart - hvis temperaturen er under 640°C - forårsage en ændring i mineralogien.

Forenklet sagt vil der ske følgende mineralreaktioner, efterhånden som der tilsættes mere og mere fluor til den faste bjergart: Glimmermineralet biotit bliver først omdannet til topas og kvarts, derefter vil kaliumfeldspat og natriumfeldspat (albit) omdannes til topas, og tilsidst omdannes topas til kvarts. Dette vil ændre den oprindelige biotit-granit til en topas-kvarts greisen og videre til en kvartsrig greisen.

Ved en tilsætning af omkring 10% fluor, vil kvarts være ustabil, og den faste fluorrige granit/greisen omdannes til en ejendommelig fluorrig væske, en superkritisk vandig fluorid smelte.



Figur 13. Eksperimentelt diagram for systemet granit-vand-flussyre ved 1.000 atm tryk (svarer ca. til 1 kilobar).

Fra Glyuk og Antilogov 1973. L_1 og L_2 er ublandbare silikat- og fluoridsmelter.

Placeret i en større sammenhæng som i Ivittuut er den mest betydningsfulde konklusion af ovenstående, at den fluorrige greisen kan omdannes til en fluoridsmelte ved temperaturer på omkring 600°C og sandsynligvis endnu lavere. Det vil dog kræve flere eksperimentelle undersøgelser at afgøre, om et højere indhold af jern, kuldioxid eller svovl - som konstateret i Ivittuut - vil ændre konklusionen.

Der er en række andre træk ved fluorrige granitiske smelter, som er relevante for at forstå kryolitforekomstens dannelse. Smelterne opdeles ofte i en silikatsmelte og en fluoridsmelte, ofte sammen med fluorholdige dampe, som ved langsom afkøling vil danne højtemperaturopløsninger, hvorfra der kan udkrystallisere fluorholdige mineraler, herunder kryolit. Ved tilsætning af fluor til en granitisk smelte vil grundstofmobiliteten øges, da smelten bliver mere letflydende. Dette fører til dannelsen af store velformede krystaller.

Accepterer man, at kryolitforekomsten blev dannet ved smeltning af de faste greisener, fjernes en række geologiske problemer. For det første kan det usædvanligt høje indhold af aluminium stamme fra aluminiumholdige mineraler i greisen - her særligt kaliumglimmeren phengit og i mindre omfang kaliumfeldspat og topas. For det andet løses rumproblemet: Kryolitforekomsten optager simpelthen den plads, hvor der tidligere var greisen. For det tredje kan de manglende kryolitførende kanaler, som førte kryolitopløsninger op gennem Ivittuut granitrøret og frem til kryolitforekomsten, nu forstås. Kryoliten blev ikke ført frem fra dybet, men blev dannet på stedet. Granitrøret virkede blot som fødekanal for fluider rige på vand, fluor og andre mobile stoffer som natrium, kuldioxid, svovl, zink, kobber og bly.

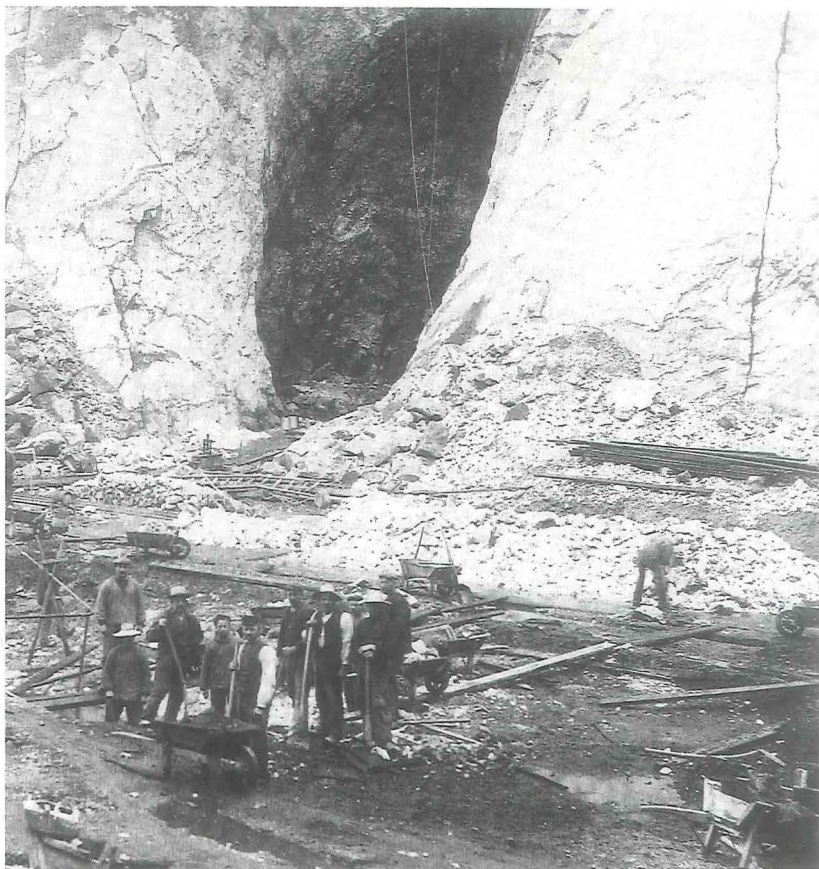
Hvis man skal forestille sig dannelsen af kryolitforekomsten, er udgangssituationen en stor sejtflydende masse med en sammensætning svarende til den samlede kryolitforekomst. Den videre udvikling vil omfatte en adskillelse af massen i en silikatrig smelte og en fluorrig smelte. Dette vil svare til de 8,5 millioner tons af siderit-kvarts enheden og de 3,8 millioner tons i de overliggende fluorrige enheder.

Adskillelsen i en silikatrig og en fluorrig smelte må have fundet sted, da forekomsten var i smeltet tilstand. Den efterfølgende udvikling af den øvre kryolitrige del af forekomsten foregik i tre stadier, som beskrevet

ovenfor.

Endelig skal det fremhæves, at det snævre rør af Ivittuut granit udgjorde et virksomt redskab for opstigning og opkoncentrering af fluorrige opløsninger fra det underliggende granitlegeme. En sådan højst udsædvanlig opkoncentrering var en nøglefaktor i frembringelsen af verdens eneste økonomiske forekomst af kryolit.

Denne artikel er i store træk baseret på et livslangt studium af Ivittuut kryolitforekomsten af nu afdøde professor i mineralogi ved Danmarks Tekniske Universitet, Hans Pauly (se bagside).



Arbejde i kryolitminens bundlag år 1909. Foto: Kryolitselskabet Øresund A/S, med tilladelse.