

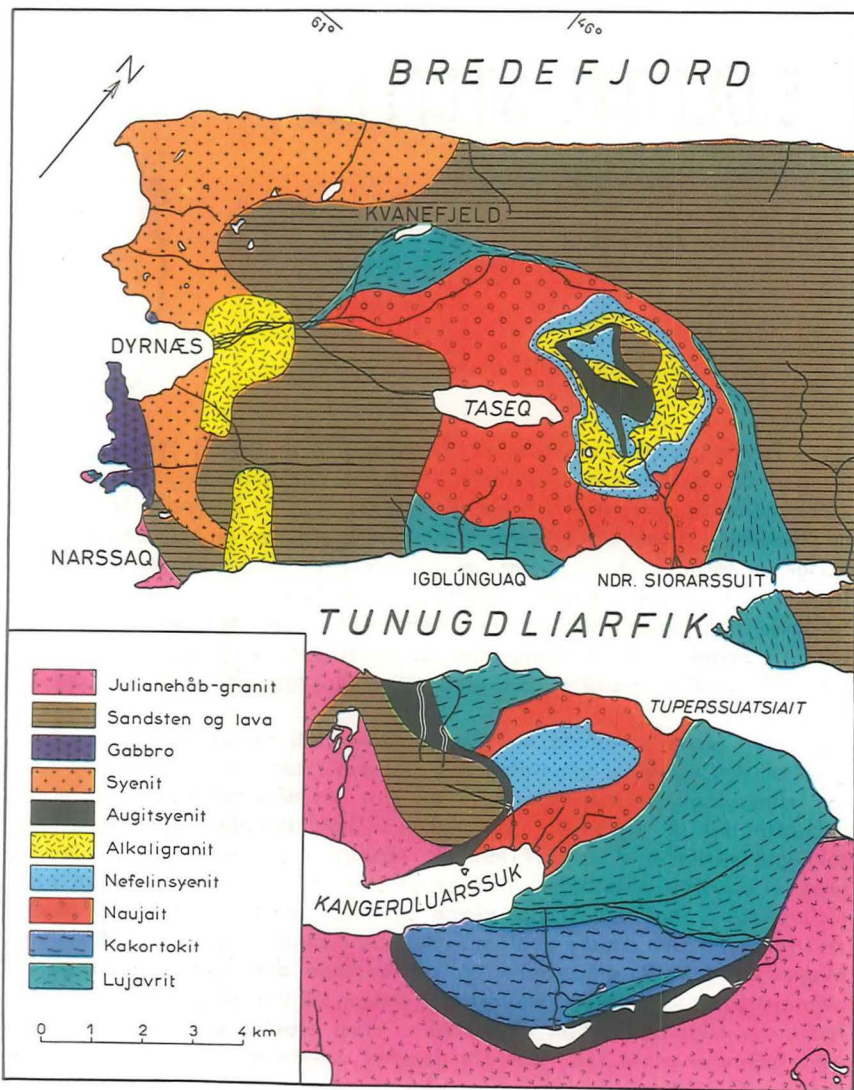
SJÆLDNE STOFFER

af JOHN HANSEN



På trods af sit svære navn er Ilimaussaq - et fjeld i Sydvestgrønland - en af de mest kendte lokaliteter i verden. Berømtigheden, der er et ca. 100 kvadratkilometer stort bjergartskompleks, ligger i nærheden af den lille by Narsaq. Komplekset består af sjældne bjergarter og mineraler, hvoraf mange for første gang er fundet her og kun her. Andre kendes foruden fra Ilimaussaq kun fra en søsterforekomst på Kolahalvøen i Sovjetunionen. Naturligvis har sjældenhederne stor videnskabelig interesse, men der er desuden til området knyttet økonomiske forventninger, på grund af tilstedeværelse af værdifulde stoffer som uran, thorium, niobium, beryllium og zirconium.

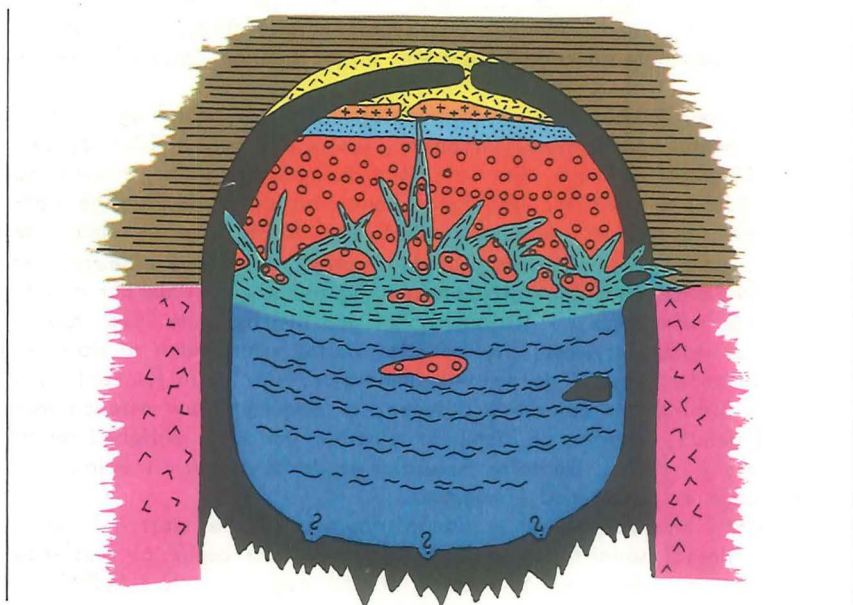
Den første beretning om Ilimaussaqområdets særpregede bjergarter er givet af den østrigske mineralog K.L.Giesecke som i årene 1806-13 foretog mineralogiske undersøgelser i en stor del af Vestgrønland og på den sydligste del af østkysten. Det lange ophold skyldtes napoleonskrigene, som også medførte at en af Gieseckes sendinger af mineralprøver blev opbragt af engelske krigsskibe, hvorfor en stor del af hans indsamlede materiale endte i Skotland til stor glæde og senere berømmelse for derværende mineraloger. Den danske geolog K.J.V.Steenstrup besøgte området i slutningen af det 19. århundrede og udarbejdede det første geologiske kort over området. Det blev imidlertid professor N.V.Ussing, der foretog den første egentlige beskrivelse af området. Hans arbejde er blevet et klassisk værk inden for geologien. Der gik derefter næsten et halvt århundrede inden nye detaljerede undersøgelser blev foretaget. Disse undersøgelser påbegyndtes af Grønlands Geologiske Undersøgelse (GGU) og Atomenergi-kommissionen (AEK) i 1955. GGU havde fra 1955-1963 hovedbase i Dyrnæs nær Ilimaussaq. Da GGU flyttede sin hovedaktivitet nord på, blev den videre undersøgelse af Ilimaussaq-komplekset overdraget Københavns Universitet, som en speciel forskningsopgave, der dog løses i samarbejde med de to nævnte institutioner



Geologisk kort over Ilimaussaq-intrusionen. Den først dannede bjergart er augitsyenit, der findes langs intrusionens rand og top. Senere er de sjældne nefelinsyeniter naujait, kakortokit og lujavrit dannet.

På grundlag af dette geologiske kort har det været muligt at fremstille rekonstruktionen vist på modsatte side (efter Ferguson).

Ilmaussaq-komplekset er en intrusion d.v.s. den er dannet ved størkning af smeltede stenmasser, magma, der er trængt op i jordskorpen, hvor de er størknet p.g.a. afkøling mod den koldere sidesten. Forekomsten er dannet for ca. 1000 millioner år siden, og er således næsten samtidig med kryoliten i Ivigtut - en anden grønlandsk berømtthed i geologien.



Rekonstruktion af Ilmaussaq-magmakammeret. Signaturer som på kortet.

For ca 1400 millioner år siden bestod områdets overflade kun af granit, der p.g.a. årmillionernes slid var nedbrudt til en plan flade, et såkaldt peneplan. Der var ørkenklima og på graniten blev aflejret ørken-sand. Til tider lå området under vandets overflade og der aflejredes sand, grus eller store sten afhængig af vanddybden og afstanden fra land. Sandet er i tidens løb hærdnet til kvartsit og gruset og de større sten til konglomerat. Til tider slog jordskorpen revner, og gennem disse strømmede magma frem til jordoverfladen og ud gennem vulkaner. Vulkanernes tilførselskanaler - de såkaldte gange, - skærer som rette linier gennem de ældre bjergarter. I nogle millioner år blev skiftevis afsat sand og vulkansk materiale. Dette kan f.eks. studeres ved Nunasarnaq på nordsiden af Tunugdliarfik, hvor man i et over 500 meter højt profil ser vekslende lag af sandsten og lava.

Samtidig med, at sandet og lavaen blev afsat på jordoverfladen fandtes dybt nede et stort magmakammer. Det er ved størkning af dette magma, Ilimaussa- intrusionen er dannet. Medens lavaen er størknet hurtigt, har magmaet været måske millioner af år om at størkne. Lavaen har således dannet et tag, hvorunder magmaet er størknet.

Den første bjergart, der størknede var augitsyenit, der i dag findes langs intrusionens rand. Medens augitsyenit er en forholdsvis almindelig bjergart, er de senere dannede bjergarter meget sjældne typer af nefelinsyenit.

I magmaet fandtes flygtige forbindelser som fluor, chlor og vand og sjældne elementer som lithium, zirconium, uran, thorium, niobium og beryllium. Disse stoffer indgik ikke i de først dannede mineraler, hvorfor de koncentreredes i restsmelten. Den øgede koncentration af de flygtige stoffer bevirkede, at trykket i magmakammeret steg. Dette høje tryk har i de fleste intrusioner i verden bevirket, at de flygtige og sjældne elementer er sivet ud i den omgivende bjergarts sprækker og revner, hvor de har dannet pegmatit og malmgange. I Ilimaussa har den overliggende lava været i stand til at modstå trykket. Trykket blev derfor efterhånden så stort, at de flygtige stoffer indgik i de dannede mineraler. Den store koncentration af flygtige forbindelser bevirkede desuden, at magmaet blev mere og mere tyndflydende, hvorfor de dannede mineraler har haft mulighed for at bevæge sig i dette. De lette mineraler er derfor steget til vejrs, mens de tunge er sunket ned i magmaet.

Øverst i magmakammeret er dannet naujait, der har stort indhold af det lette mineral sodalit, og nederst kakortokit, der består af vekslende røde, hvide og sorte lag. Bjergarten er rød p.g.a. et stort indhold af zirconium-mineralet eudialyt. Kakortokit, der er et af de bedste eksempler på lagdelte intrusive bjergarter, kendes kun fra Ilimaussa.

Efter dannelsen af disse bjergarter foregik der en bevægelse i området hvorved specielt lavabjergarterne blev stærkt udvalset.

Af magmaet, der efter dannelsen af naujait og kakortokit var beriget på flygtige forbindelser og sjældne stoffer, blev lujavriten dannet. Dette magma blev presset op i de overliggende bjergarter: naujait, augitsyenit, lava og sandsten, hvori den i dag fremtræder som større sammenhængende legemer og årer.

Lujavritmagmaet har haft stort indhold af uran, thorium og niobium. Af disse stoffer er dannet de radioaktive mineraler steenstrupin og monazit, der findes jævnt fordelt i lujavriten og koncentreret i grænseområderne, hvor der er indeslutninger af ældre bjergarter i lujavriten. De flygtige forbindelser fra lujavritmagmaet, heriblandt niobiumforbindelserne, var mere mobile end det egentlige lujavritmagma. De kunne derfor gennemsive de mindste revner og sprækker i de udvalgte bjergarter, hvori de er blevet afsat p.g.a. afkøling. De dannede niobium-mineraler murmanit og nio-

bophyllit findes derfor ikke i lujavriten, men i de udvalgte bjergarter nær grænseområderne mod lujavriten.

Det sidste restmagma var ekstremt beriget på uran, thorium, niobium og beryllium. Opløsningsproblemerne trængte gennem revner og sprækker i de tidligere dannede bjergarter. Deres størkningsprodukt fremtræder nu som hvide eller svagt rødlige årer. I disse årer findes beryllium-mineralerne og niobium-mineralerne epistolit og pyrochlor.

ØKONOMISK MULIGE MINERALER

Ilimaussaag-området mineralforekomster har tidligt interesseret geologerne. Der blev således allerede i forrige århundrede gjort forgæves forsøg på at udnytte mineralet eudialyt, på grund af dets indhold af metallet zirconium, der bl.a. anvendes til stålforædling, smeltedigler, keramik og svejseelektroder. Fra 1955 har interessen først og fremmest samlet sig om uran og thorium og fra 1965 desuden om niobium og beryllium.

Uran og thorium.

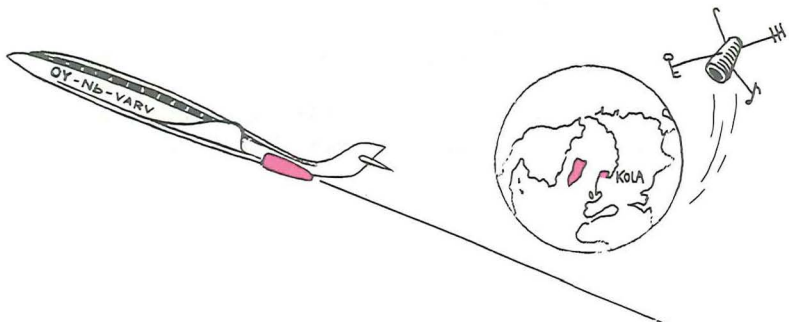
Medens uran i mange år har været anvendt til atomreaktorer, har interessen for thorium hidtil været ringe. Dette skyldes, at thorium ikke som naturligt uran indeholder spaltelige kerner. Man må derfor ved start af en thoriumreaktor anvende en blanding af thorium og beriget uran. Disse reaktorer er ikke i dag konkurrencedygtige på grund af den høje pris på beriget uran. Da der i verden findes ca. 7 gange så meget thorium som uran og da uranet indenfor en overskuelig fremtid vil blive opbrugt, er der i de sidste år sat meget ind på at gøre thoriumreaktorer billigere. Dette er heldigt for Ilimaussaag-forekomsten der indeholder ca. $2\frac{1}{2}$ gange så meget thorium som uran.

Beryllium udgør under 0.001 % af jordskorpen. Det findes ikke rent i naturen men forekommer i over 30 mineraler. Det økonomisk vigtigste mineral er beryl der fra de ældste tider har været anvendt som ædelsten p.g.a. stor hårdhed og smukke farver. Beryl-varieteteten smaragd er grøn, mens aquamarin er blå til blågrøn. Beryllium er et af de letteste metaller med en vægtfylde på $1,8 \text{ g/cm}^3$. Den vigtigste anvendelse af beryllium er som legeringsmetal idet en ringe mængde beryllium forbedrer mange andre metaller egenskaber i eminent grad. Det anvendes således inden for elektroniken, i atomreaktorer m.m. Det er særlig inden for luft- og rumfart man drager nytte af berylliums lave vægt i forbindelse med dets store styrke ved høj temperatur. For hvert kg, vægten af et fly reduceres spares årligt tusinder af kroner. For satellitter spares titusinder af kroner hver gang vægten reduceres med et kg. Rumpiloterne er desuden under nedturen skærmet mod gnidningsvarmen af et skjold af berylliumoxid.



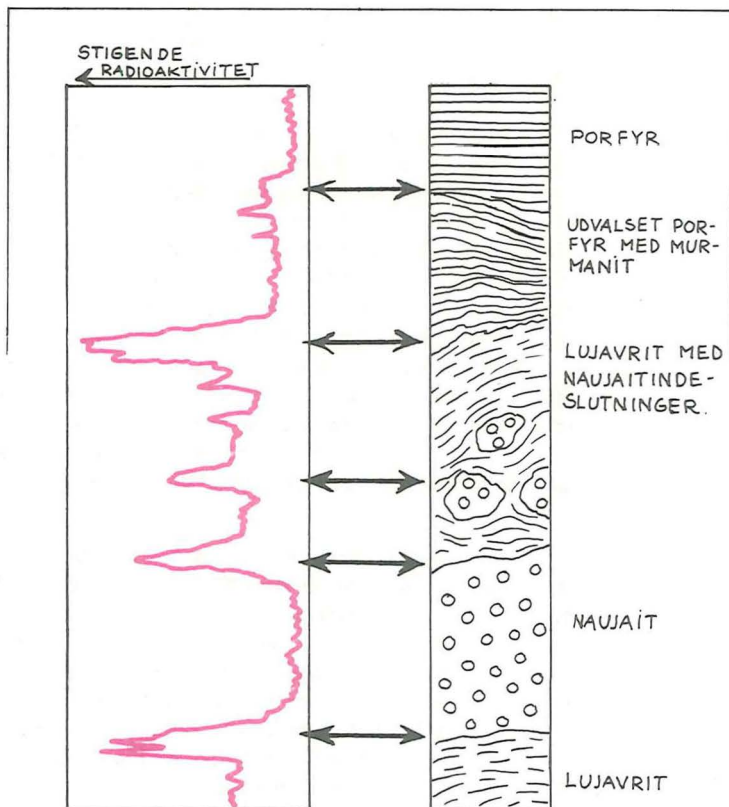
Billederne viser to af de helt specielle bjergarter, der findes i Ilimaussaq intrusionen. Når bjergarterne er så specielle, har geologerne foretrukket at give dem navne af lokal oprindelse eller efter findestederne. Bjergarten på billedet til venstre er den smukke grovkornede NAUJAIT (naujat er grønlandsk for måge), hvor de store røde klatter er mineralet eudialyt, der indeholder en lang række sjældne grundstoffer, især zirconium. Bjergarten på billedet til højre er KAKORTOKIT (kakortoq er grønlandsk for hvid), en bjergart med en helt speciel struktur af vekslende hvide, røde og sorte lag. En tredje bjergart LUJAVRIT, der er sort og grøn henter sit navn fra Kolahalvøen (efter stedet Lujavr-urt), hvor på den anden side flere grønlandske navne finder anvendelse.

Niobium er et stålgråt metal med højt smeltepunkt (ca. 2500°C). Det har stor hårdhed og er modstandsdygtigt over for de fleste kemiske reagenser. Niobium angribes således hverken af salpetersyre, saltsyre eller kongevand. Niobium benyttes overvejende som legeringsmetal sammen med jern, hvor man kræver stor styrke ved høj temperatur som f.eks. i jetmotorer. Legeringer af niobium-tin og niobium-zirconium anvendes til superkraftige magneter, der kan opretholde magnetfelter af hidtil ukendt styrke praktisk taget uden at forbruge strøm.



Uran

Interessen for uran på Grønland går tilbage til 1955, da Atomenergi-kommissionen (AEK) blev oprettet, og man fra AEK's side var interesseret i straks at starte en uraneftersøgning på Grønland. Fra geologiske afhandlinger fra det 19. århundrede vidste man, at der fandtes radioaktive mineraler i Ilimaussa-q-komplekset. Det var derfor nærliggende at starte ef-



Geologi i borer. Diagrammet til venstre viser radioaktiviteten målt i borehullet og søjlen til højre er bjergarterne fundet i borekernen. Porfyr og naujait er ikke radioaktive - den udvalgte porfyr svagt radioaktiv - lujuvrit stærkere radioaktiv. De radioaktive mineraler (steenstrupin og monazit) er koncentreret op mod indeslutninger af ældre bjergarter i lujuvrit.

tersøgningen der. De mest lovende forekomster blev hurtigt fundet på Kvanefjeldsplateauet i områdets nordøstligste del. I 1957 påbegyndtes mere indgående undersøgelse her. Resultatet af disse undersøgelser blev, at der i 1958 blev foretaget 36 diamantboringer med en samlet kernelængde på over 4000 meter. På grundlag af disse undersøgelser blev indholdet af uran beregnet til 4000 tons og indholdet af thorium til ca. 10.000 tons i en samlet bjergartsmasse på 12 millioner tons. Der er således i Danmark mere uran pr. indbygger end i U.S.A. Til sammenligning kan det anføres at der af 1 kg uran og thorium teoretisk kan udvindes lige så meget varmeenergi som af 1000 tons gode kul. I praksis er udbyttet dog væsentligt lavere.

Uranet findes i kiselsyreholdige mineraler (silikater). Da man ikke tidligere har udvundet uran af et silikatmineral har Risø's kemikere selv måttet finde en metode til udvinding af den grønlandske uranmalm. I 1962 var de nået så langt med dette arbejde, at de ønskede en større mængde malm til opbejdningsforsøg. Der blev derfor dette år hjemtaget 200 tons uranmalm fra Kvanefjeldsplateauet. I 1964 var det lykkedes dem at finde en anvendelig fremgangsmåde til udvinding af malmen. Der blev derfor påbegyndt en detaljeret geologisk kortlægning af forekomsten med henblik på udvinding. Allerede samme år blev det klart, at forekomsten var betydelig større end de 4000 tons uran og de 10.000 tons thorium man tidligere angav. Det vil imidlertid kræve nye og dybere boringer at bestemme forekomstens nøjagtige størrelse. Sideløbende med feltarbejdet bearbejder geologerne det indsamlede materiale herunder de over 4000 m borekerner.

Beryllium

Man har i flere år kendt beryllium-mineraler fra Ilimaussaq, men det drejer sig om små forekomster der har stor videnskabelig interesse, men som er uden økonomisk betydning. Under ekspeditionen i 1964 blev der imidlertid fundet en beryllium-mineralisering, der muligvis kan få økonomisk betydning. Der er hidtil fundet ialt 10 beryllium-mineraler i Ilimaussaq. Det vigtigste er chkalovit, der første gang er fundet på Kolahavøen. Mineraliet indeholder 12% BeO , eller det samme som mineralet beryl, hvorpå næsten hele verdens produktion af beryllium i dag er baseret. Ved undersøgelsen af beryllium-mineraliseringen anvendes et på Risø konstrueret beryllometer, hvormed man direkte på klippen kan bestemme indholdet af beryllium i bjergarten. Princippet for beryllometeret er, at en i dette anbragt radioaktiv kilde udsender γ -stråling, der spalter beryllium i gassen helium og en neutron. De udsendte neutroner, der er et mål for indholdet af beryllium i prøven bestemmes ad elektronisk vej. Beryllometeret har med held været anvendt i 1965 og 1966. De første beryllometre var ret tunge (41 kg.) p.g.a. den store mængde bly, der er brugt til afskærmningen af den radioaktive kilde. Nye beryllometre med mindre vægt (20 kg.) og større måleflade vil blive anvendt i 1967.

Beryllium-mineraler fundet i Ilimaussaq-intrusionen

Mineral	Formel	% BeO
Bertrandit	$\text{Be}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2$	40-43
Beryllit	$\text{Be}_3\text{SiO}_4(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$	40
Chkalovit	$\text{Na}_2\text{BeSi}_2\text{O}_6$	11-13
Epididymit	$\text{Na}(\text{BeSi}_3\text{O}_7)(\text{OH})$	11
Eudidymit	$\text{Na}(\text{BeSi}_3\text{O}_7)(\text{OH})$	11
Genthelvin	$\text{Zn}_8(\text{BeSiO}_4)_6\text{S}_2$	11-14
Leucophan	$\text{NaCa}(\text{BeSi}_2\text{O}_6)\text{F}$	10-12
Sorensenit	$\text{Na}_4\text{SnBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{16}(\text{OH})_4$	7-8
Spherobertrandit	$\text{Be}_5(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_4$	40-43
Tugtupit	$\text{Na}_8\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{24}(\text{Cl}_2, \text{S})$	5

Niobium

Der er i Ilimaussaq hidtil fundet 9 niobium-mineraler men kun epistolit-murmanit og pyrochlor findes i en sådan mængde, at de muligvis kan få økonomisk betydning. Epistoliten findes i de samme årer hvori berylliummineralerne findes, pyrochloren findes i den radioaktive bjergart på Kvannefjeldsplateauet. Murmanit findes derimod i områder uden andre økonomisk vigtige mineraler. En eventuel brydning af murmanitførende bjergarter skal derfor foretages for murmanitens skyld.

Niobium-mineraler fundet i Ilimaussaq-intrusionen

Mineral	Formel	% Nb ₂ O ₅
Epistolit	$(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Nb}, \text{Ti}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})(\text{OH})\text{SiO}_4$	32
Gerassimovskit	$\text{TiNb}(\text{OH})_9$	41
Igdloit	NaNbO_3	62
Ilimaussit	$\text{Na}_4\text{Ba}_2\text{CeFeNb}_2\text{Si}_8\text{O}_{28}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	13
Murmanit	$\text{NaTi}(\text{OH})\text{SiO}_4$	0,6-9
Nenadkevichit	$(\text{Ba}, \text{K}, \text{Na})(\text{Ti}, \text{Nb})\text{Si}_2\text{O}_7\cdot \text{H}_2\text{O}$	28
Niobophyllit	$(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Ce})_3(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})_{6-7}$ $(\text{Ti}, \text{NbTa})_2(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{25}(\text{OH}, \text{F})_6$	9
Pyrochlor	$(\text{Na}, \text{Ca})_2(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2\text{O}_6(\text{OH}, \text{F}, \text{O})$	41-59
Tundrite	$\text{Na}_2(\text{Nb}, \text{Ce})_4(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{Si}_2\text{O}_{15}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	6



Beryllometermåling på Taseq skråningen.

Beryllometeret udsender radioaktiv stråling der omdanner beryllium til helium og neutroner. Antallet af dannede neutroner er et mål for indholdet af beryllium i prøverne.

Økonomisk vigtige grundstoffer i Ilimaussaq

Uran og thorium	ca. 350 kr pr kg	!
Niobium	ca. 700 kr pr kg	
Beryllium	ca. 1000 kr pr kg	

Når man skal vurdere mulighederne for en eventuel udnyttelse af forekomsten er det væsentligt, at oparbejdning af uran, thorium, niobium og beryllium vil kunne foretages i samme fabrik, samt at forekomsterne vanskeligt kunne ligge bedre på Grønland, idet der kun er ca. 5 km til fjorden med de bedste muligheder for anlæggelse af en havn.

Aty Hansen